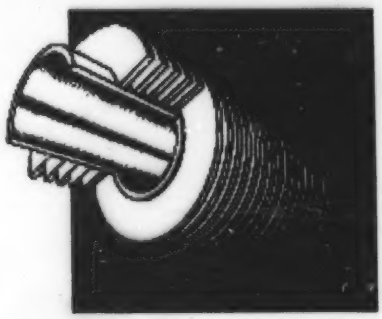
TP 13902F

PROJET RξHP²

DÉVELOPPEMENT ET IMPLANTATION D'UN SYSTÈME DE GESTION THERMIQUE POUR VÉHICULE ÉLECTRIQUE

Préparé pour le

Centre de développement des transports
Transports Canada
Montréal (Québec)



Par

GROUPE ξ ÉNERSTAT

Février 2002

TP 13902F

PROJET RÉHP²

DÉVELOPPEMENT ET IMPLANTATION D'UN SYSTÈME DE GESTION THERMIQUE POUR VÉHICULE ÉLECTRIQUE

Par

Stéphane Bilodeau, ing., Ph.D.

GROUPE ÉNERSTAT

Février 2002

AVERTISSEMENT

Les opinions et les vues exprimées dans ce rapport sont celles des auteurs (ou du contractant) et ne reflètent pas nécessairement celles du Centre de développement des transports.

Le Centre de développement des transports n'a pas l'habitude de citer des noms de produits ou de fabricants. S'il le fait ici, c'est simplement pour la bonne compréhension du texte.

À moins d'indication contraire dictée par le contexte, le masculin s'entend du féminin et vice versa.

ÉQUIPE DE RECHERCHE

Stéphane Bilodeau, ing., M. Sc. A., Ph. D., président
Patrick Lemay, ing., M. Sc. A.
Don Potvin, ing.
Manon Desaulniers, ing.
Simon Sansregret, ing. stag., M. Sc. A.
Jacques Gagné, ing., M. Sc. A. instrumentation

REMERCIEMENTS

Le Groupe Énerstat inc. désire remercier Claude Guérette du Centre de développement des transports de Transports Canada pour son soutien et ses conseils.

An English summary is included before the Table of Contents.

Transports Canada / Transport Canada

FORMULE DE DONNÉES POUR PUBLICATION

1. N° de la publication de Transports Canada	2. N° de l'étude	3. N° de catalogue du destinataire
TP 13902F	9487-88	

4. Titre et sous-titre

Projet R§HP² : Développement et implantation d'un système de gestion thermique pour véhicule électrique

5. Date de la publication

Février 2002

6. N° de document de l'organisme exécutant

7. Auteur(s)

Stéphane Bilodeau

8. N° de dossier - Transports Canada

ZCD2450-D-648-4

9. Nom et adresse de l'organisme exécutant

Groupe Énerstat
79, rue Wellington Nord, bureau 202
Sherbrooke (Québec)
J1H 5A9

10. N° de dossier - TPSGC

XSD-8-00912

11. N° de contrat - TPSGC ou Transports Canada

T8200-8-8545/001/XSD

12. Nom et adresse de l'organisme parrain

Centre de développement des transports (CDT)
800, boul. René-Lévesque Ouest
Bureau 600
Montréal (Québec)
H3B 1X9

13. Genre de publication et période visée

Final

14. Agent de projet

C. Guérette

15. Remarques additionnelles (programmes de financement, titres de publications connexes, etc.)

Projet coparrainé par le Programme de recherche et développement énergétiques (PRDE) de Ressources naturelles Canada

16. Résumé

Ce rapport présente le projet de développement et d'implantation d'un système de contrôle climatique pour véhicules électriques (VÉ), le R§HP², adapté aux climats froids. Le système développé propose une solution sans émission polluante qui combine l'utilisation d'une pompe à chaleur avec stockage comme noyau central. La gestion thermique de l'ensemble du VÉ est rendue possible par l'intégration de différentes technologies novatrices tels l'échangeur à air compact, le stockage à changement de phase, le régénérateur passif.

Des tests en laboratoire, l'implantation dans un véhicule de livraison postal et des tests en chambre climatique dans le véhicule pilote ont été effectués au cours du projet. La performance du système est moins dépendante des conditions climatiques. Contrairement aux thermopompes air-air usuelles, le R§HP² peut fonctionner jusqu'à -25 °C, sans diminution significative du rendement, tout en comblant l'ensemble de la charge de chauffage et de ventilation du véhicule. La régénération de l'énergie permet un renouvellement constant de l'air de l'habitacle assurant une qualité de l'air maximale et un dégivrage efficient des surfaces vitrées sans pénalité énergétique importante.

Les résultats ont révélé que le R§HP² offre, à -20 °C, un coefficient de performance supérieur à 3.0. De plus, le système permet de maintenir un confort, un renouvellement d'air et un givrage minimal sans requérir aux énergies fossiles. Il reste toutefois quelques éléments à optimiser dont la puissance au démarrage et le poids du système. Des pistes de solutions sont déjà envisagées pour atteindre ces objectifs.

17. Mots clés	18. Diffusion
Contrôle climatique, stockage d'énergie, véhicule électrique, innovation technologique, gestion thermique, thermopompe, ventilation	Le Centre de développement des transports dispose d'un nombre limité d'exemplaires.

19. Classification de sécurité (de cette publication)	20. Classification de sécurité (de cette page)	21. Déclassification (date)	22. Nombre de pages	23. Prix
Non classifiée	Non classifiée	—	xx, 33	Port et manutention

Transport Canada / Transports Canada

PUBLICATION DATA FORM

1. Transport Canada Publication No.	2. Project No.	3. Recipient's Catalogue No.
TP 13902F	9487-88	

4. Title and Subtitle

Projet RξHP^2 : Développement et implantation d'un système de gestion thermique pour véhicule électrique

5. Publication Date

February 2002

6. Performing Organization Document No.

7. Author(s)

Stéphane Bilodeau

8. Transport Canada File No.

ZCD2450-D-648-4

9. Performing Organization Name and Address

Groupe Énerstat
79 Wellington Street North, Suite 202
Sherbrooke, Quebec
J1H 5A9

10. PWGSC File No.

XSD-8-00912

11. PWGSC or Transport Canada Contract No.

T8200-8-8545/001/XSD

12. Sponsoring Agency Name and Address

Transportation Development Centre (TDC)
800 René Lévesque Blvd. West
Suite 600
Montreal, Quebec
H3B 1X9

13. Type of Publication and Period Covered

Final

14. Project Officer

C. Guérette

15. Supplementary Notes (Funding programs, titles of related publications, etc.)

Co-sponsored by the Program of Energy Research and Development (PERD) of Natural Resources Canada (NRCan)

16. Abstract

This report details the second phase of a project to develop and install the RξHP^2, a climate control system for electric vehicles (EVs) that is suited to cold climates. The system was developed as a possible solution that does not produce polluting emissions and that combines a heat pump with a heat storage unit as its central component. Heat management for the EV as a whole is made possible by integrating various innovative technologies, such as a compact air exchanger, phase transformation storage and a passive regenerator.

Laboratory tests, installation in a postal delivery vehicle and pilot vehicle tests in a climatic chamber were carried out during the project. The system's performance was less dependent on weather conditions. Unlike regular air-to-air heat pumps, the RξHP^2 can operate at temperatures as low as –25°C without a significant decrease in performance, while meeting all of the vehicle's heating and ventilation load requirements. Energy regeneration allows for continuous air renewal in the cab while ensuring optimal air quality and efficient defrosting of glass surfaces without significant energy loss.

Results revealed that the RξHP^2 provides a coefficient of performance above 3.0 at –20°C. The system can also maintain comfort, provide air renewal and offer optimal defrosting without using fossil fuels. However, a few elements, such as start-up power and system weight, still require improvement. Possible solutions are already being considered to meet these objectives.

17. Key Words	18. Distribution Statement
Climatic control, energy storage, electric vehicle, technological innovation, heat management, heat pump, ventilation	Limited number of copies available from the Transportation Development Centre

19. Security Classification (of this publication)	20. Security Classification (of this page)	21. Declassification (date)	22. No. of Pages	23. Price
Unclassified	Unclassified	—	xx, 33	Shipping/ Handling

SOMMAIRE EXÉCUTIF

Le déploiement des véhicules électriques (VÉ) représente une question d'importance pour atteindre les objectifs vitaux d'amélioration de la qualité de l'air qui ont été définis à Kyoto en 1997. L'utilisation des VÉ à grande échelle se bute encore à différentes embûches, notamment à l'autonomie des VÉ et à leur prix. Particulièrement, de par leur nature, les véhicules électriques sont vulnérables aux conditions climatiques extrêmes. Dans les climats froids, comme ceux du Canada ou du nord des États-Unis, les charges de chauffage et de ventilation affectent directement l'autonomie et la performance du VÉ. Contrairement aux véhicules à moteur à combustion interne, les véhicules électriques ne disposent pas de source d'énergie suffisante pour alimenter les systèmes de confort thermique. Dans le cas des VÉ, en quelque sorte prisonniers de leur efficacité à transformer l'énergie électrique en traction motrice, peu d'énergie thermique est rejetée et disponible pour le chauffage de l'air et de l'habitacle.

À ce jour, même si quelques systèmes offrent une amélioration de certains points, aucune solution, tangible et écologiquement propre, de l'ensemble des inconvénients liés à l'opération des VÉ en climats froids n'est disponible sur le marché. Dans la première phase du présent projet réalisé avec l'appui du Centre de développement des transports de Transports Canada, une étude de faisabilité technique avait démontré le potentiel d'une nouvelle technologie à solutionner le problème en question, le concept RξHP^2. Le présent projet de développement de la technologie RξHP^2 a été mené à bien grâce à l'étroite collaboration de divers partenaires. En plus de l'équipe de Groupe Énerstat inc., responsable du développement général du système RξHP^2, les différents partenaires sont notamment : Innergytech inc. (Venmar), SMIS R&D inc. (CMAC inc.), Caron et Fils inc., Groupe THERMAUS, et le Centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie (CANMET) Laboratoire de recherche en diversification énergétique (LRDEC) de Ressources naturelles Canada.

Le concept RξHP^2 propose une solution sans émission polluante, qui combine l'utilisation d'une pompe à chaleur avec stockage comme noyau central. La gestion thermique de l'ensemble du VÉ est rendue possible par l'intégration de différentes technologies novatrices tels :

- un échangeur à air compact,
- un stockage à changement de phase,
- un régénérateur passif.

Essentiellement, l'air vicié évacué de l'habitacle du véhicule passe à travers un régénérateur. Ce régénérateur permet de réchauffer l'air frais provenant de l'extérieur tout en récupérant une grande partie de l'énergie de l'air vicié évacué. Cet apport d'air frais permet aussi de diminuer le besoin de dégivrage des vitres de l'habitacle. Un condenseur d'une thermopompe est placé en série avec le régénérateur. Ce dernier a pour fonction d'augmenter la température de l'air frais pour combler le reste de la charge de chauffage.

La thermopompe haute performance est composée d'un évaporateur muni d'un accumulateur thermique. Le fonctionnement de ce dernier est basé sur le stockage de chaleur par la fusion d'un matériau à changement de phases (MCP). Malgré les fluctuations importantes des conditions climatiques, le stockage permet de stabiliser le rendement de la thermopompe.

L'ensemble du système est donc en mesure de maintenir des conditions de confort tout au long de la saison de chauffage.

Les objectifs techniques du projet ciblent particulièrement le confort thermique de l'utilisateur d'un VÉ, il s'agit donc :

- de maintenir des conditions de confort thermique pour l'utilisateur d'un VÉ par climat froid en affectant le moins possible l'autonomie du véhicule et en utilisant une technologie écologiquement propre; donc, d'éliminer l'utilisation de combustibles pour les fonctions de chauffage;
- de maximiser la performance de la thermopompe en minimisant les impacts sur l'autonomie du véhicule;
- de réduire le poids et le volume du système;
- de réduire le coût attendu du système.

Au cours du projet, le système RÉHP[2] a été développé en 1998 et 1999, fabriqué et testé dans les chambres climatiques du Laboratoire de recherche en diversification énergétique de CANMET (LRDEC) en 1999 et 2000. Il a ensuite été implanté en 2000 dans un véhicule postal pour fin de tests sur route. Il a été testé dans une chambre climatique pour véhicule d'Environnement Canada en 2001.

Les principaux développements réalisés touchent trois des composantes du système :

1. Le régénérateur (partenariat technologique : Innergytech - Venmar et Énerstat). Le régénérateur permet de fournir un débit constant d'air frais au véhicule sans trop pénaliser la consommation d'énergie tout en assurant une bonne qualité d'air intérieur et une déshumidification variant entre 0,62 L/h et 0,93 L/h d'eau (avec un débit de 70 cfm (2 m^3/min) pour des températures extérieures se situant entre 0 °C et -20 °C). En conséquence, le couplage avec un desséchant s'est avéré non requis pour les applications de chauffage. Le régénérateur actuel offre un rendement nominal d'environ 75 %, ce qui signifie que l'on récupère 75 % de la chaleur disponible dans l'air vicié de l'habitacle.

   En bref, les résultats en terme d'efficacité par volume sont de 75 % de rendement pour un volume d'échange de 0,4 pi^3 (0,0113 m^3). Ce résultat se compare avantageusement aux échangeurs à plaques classiques qui offrent une efficacité sensible de 70 % pour environ 1,0 pi^3 (0,028 m^3) ou 82 % à 0,7 pi^3 (0,020 m^3) pour un échangeur compact).

2. Un accumulateur (partenariat technologique : Caron et Fils et Énerstat) : L'accumulateur intégré à un évaporateur (accumulateur à expansion directe du réfrigérant) est en soit une innovation. De plus, les performances obtenues se comparent avantageusement au système de stockage existant : 95 % de rendement massique (par rapport à 60 % – 80 % pour les banques de glace typiques) et un matériau à changement de phase qui offre 330 kJ/kg (par rapport à 200 à 300 pour les autres MCP). Cet accumulateur est intégré à l'unité de compression de vapeur de la pompe à chaleur (voir Figure 1).

Figure 1 Unité de compression installée

3. Le système de contrôle (partenariat technologique : SMIS R&D-CMAC et Énerstat) : Micro-contrôleur entièrement programmable et station de mesure (conditions intérieures, extérieures et d'opération) avec sondes numériques (température, voltage et humidité) et avec contrôle des composantes thermomécaniques sur un «bus» qui peut supporter l'environnement automobile et le bruit électrique des composantes de propulsion électriques (en cours de validation) et qui peut être raccordé sur un ordinateur à distance (voir Figure 2).

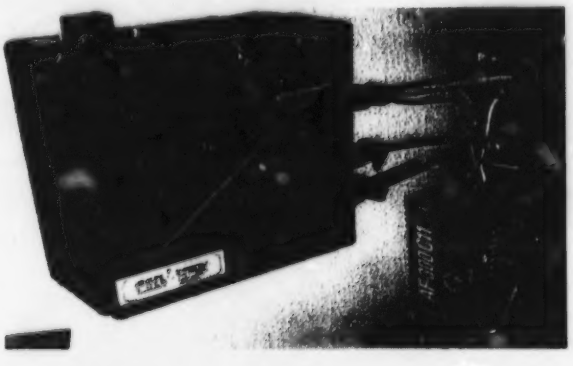


Figure 2 Unité de contrôle installée

D'autres développements ont aussi été réalisés :

- Optimisation du cycle de réfrigération, incluant une étude poussée relative au choix du réfrigérant (parmi une sélection de réfrigérants azéotropes et non-azéotropes);
- Exploitation/comparaison d'orifices précalibrés, d'une valve à pointeau ou d'une valve thermostatique pour l'expansion du réfrigérant;
- Travaux relatifs au circuit hydronique pour maintenir simplement la température de la batterie;
- Intégration (et non-juxtaposition) de quatre technologies de pointe (thermopompe, régénération, stockage par MCP et stratégie de contrôle numérique).

Les tests faits au LRDEC entre 0 °C et -30 °C ont montré que le système répond bien aux changements de conditions de températures extérieures. La puissance fournie par le système actuel est d'environ 2,5 kW, une consommation du compresseur variant entre 700 W et 800 W pour un coefficient de performance variant typiquement entre 2,5 et 2,9. La durée typique de décharge de l'accumulateur est d'environ trois heures à pleine capacité sans aucun apport des sources de chaleur auxiliaires (telles que les rejets de chaleur de l'accumulateur électrique). Avec des apports externes minimes (moins de 1 kW, soit environ 20 % des rejets de chaleur disponibles dans l'ensemble du véhicule), selon les études de A.D. Little[1], le système serait en mesure de fournir sa pleine capacité sur toute la durée des tests (soit plus de quatre heures) et l'accumulateur thermique serait toujours en mesure de fournir de l'énergie au même rythme intensif.

Les mesures montrent que le système RξHP[2] offre une puissance nominale semblable à 0 °C et à -15 °C. Cette particularité pour une thermopompe est obtenue grâce à l'intégration du stockage au circuit de réfrigération. Les essais démontrent clairement l'efficacité du principe. On remarque une dérive de la puissance thermique fournie à l'habitacle. Ce comportement attendu pourra être atténué par un stockage plus important et permettra ainsi une autonomie plus grande du système.

Les résultats du COP[2] sont remarquables à très basses températures. La récupération de chaleur de l'habitacle et le stockage dans le MCP sont les éléments déterminant cette performance.

On observe à la Figure 3 que la performance du système augmente lorsque la température diminue. C'est que la puissance de chauffage demeure relativement stable, mais la consommation d'énergie du compresseur diminue sensiblement lorsque la température chute. Cette caractéristique représente un avantage certain du système sur les autres sources d'énergie. Les systèmes concurrents sont essentiellement des thermopompes classiques air-air pour lesquelles la performance chute lorsque la température diminue. Une exception existe, le système en développement chez Valéo, qui offre des résultats intéressants jusqu'à -10 °C en utilisant un compresseur électrique (e-compresseur). Pour le système RξHP[2], la consommation d'énergie est relativement stable sur l'ensemble des conditions climatiques, tandis que la puissance fournie diminue lorsque la température augmente.

---

[1] Arthur D. Little, *Electric Vehicle Thermal Management for Cold Weather Operation* (Cambridge, MA: Northeast Alternative Vehicle Consortium, 1994).

[2] COP : Coefficient de performance (chaleur obtenue par rapport à l'énergie électrique fournie). Puissance de chauffage : Taux d'énergie moyen en kW fourni par le système sur l'ensemble du test. Puissance consommée : Consommation d'énergie électrique globale du système (incluant les ventilateurs, le compresseur, les relais et valves, les composantes électroniques, etc.).

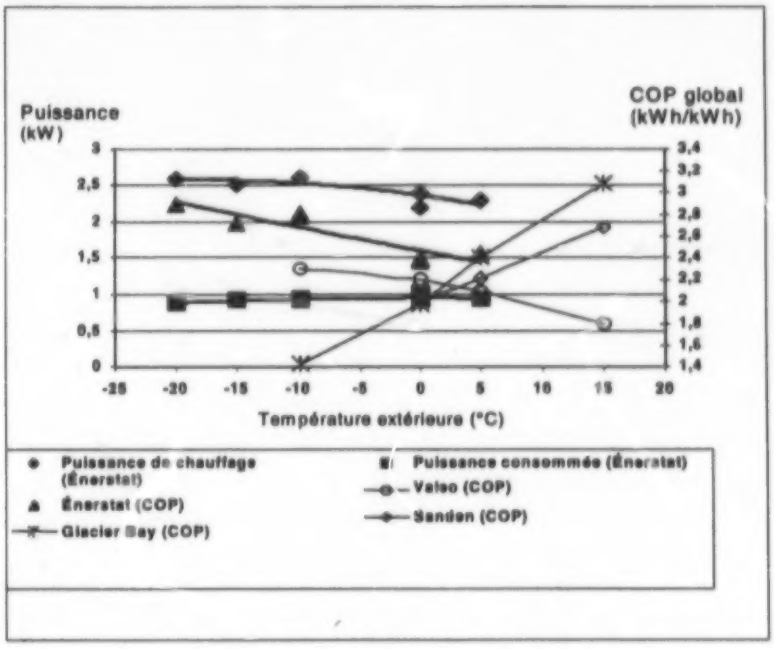


Figure 3 Effet de la température extérieure sur la performance

En plus des tests effectués en laboratoire (LRDEC), des mesures ont été effectuées avec le système implanté dans le véhicule de Postes Canada. Ces mesures ont été réalisées en juillet 2001 dans une des chambres climatiques d'Environnement Canada, Division recherche et mesure des émissions (Ottawa). De ces résultats obtenus, on peut en retirer un COP d'environ 3,0 pour une puissance de chauffage de 2,2 kW. La performance est similaire aux résultats obtenus au LRDEC, bien que la puissance y soit légèrement plus faible (2,5 kW mesuré au LRDEC).

Les résultats obtenus dans le véhicule postal en chambre climatique à -10 °C et à -20 °C présentent les mêmes tendances soulevées précédemment relativement à la puissance et à la performance du système. On observe, au surplus, que la durée du stockage représente environ de 3 à 4 heures d'usage en continu (sans interruption), ce qui représente environ de 6 à 8 heures d'opération moyenne (opération intermittente du système).

Les résultats ont permis d'observer le comportement et la performance du système. Cette performance augmente lorsque la température diminue. Cette caractéristique représente un avantage certain du système sur les autres sources d'énergie. La consommation d'énergie est relativement stable sur l'ensemble des conditions climatiques, tandis que la puissance fournie diminue lorsque la température augmente. Le tableau 1 présente les cibles de performance et les résultats obtenus lors des tests en chambre climatique.

Tableau 1 ***Cibles de performance et résultats expérimentaux sur véhicule en chambre climatique***

Objectifs	Cibles (1998)	Temp. ext.	Résultats expér.	Temp. ext.	
Autonomie du véhicule	60 %	à -20 °C	N/A	à -20 °C	% de l'autonomie en km à +20 °C
Capacité des accumulateurs	75 %	à -25 °C	N/A	à -25 °C	de la capacité en Wh à +20 °C
Confort	T_a 10 °C T_{dp} 0 °C	à -20 °C	T_a 13,5 °C T_{dp} -10 °C	à -10 °C	pour toute condition externe supérieure à -20 °C et inférieure à 0 °C
COP de la thermopompe	2,0 2,5	à -20 °C à 0 °C	2,9 2,5	à -20 °C à 0 °C	COP supérieur à 2,5 entre 0 °C et -20 °C
Coût unitaire	6 000 $		5 650 $		par prototype. Coût de production visé < 2 500 $
Compacité	0,2 m³		0,22 m³		volume de l'ensemble du système pour véhicule de promenade

T_a = Température ambiante T_{dp} = Point de rosée

Dans l'ensemble, les résultats obtenus sont très satisfaisants pour des systèmes frigorifiques à de telles températures. Des travaux d'optimisation sont toutefois à réaliser pour assurer une performance maximale du système.

En définitive, le projet a permis de valider le concept élaboré par l'équipe du Groupe Énerstat inc., développé depuis plus de cinq ans. Divers avantages ressortent de l'utilisation du RξHP² dans un VÉ opérant en climats froids :

- La performance du système est moins dépendante des conditions climatiques. Contrairement aux thermopompes air-air usuelles, le RξHP² peut fonctionner jusqu'à -25 °C, sans diminution significative du rendement, tout en comblant l'ensemble de la charge de chauffage et de ventilation du véhicule. Le couplage du régénérateur et du stockage thermique permet de stabiliser les températures de fonctionnement des sources chaude et froide de la pompe à chaleur (PAC).

- La régénération de l'énergie permet un renouvellement constant de l'air de l'habitacle assurant une qualité de l'air maximale et un dégivrage efficient des surfaces vitrées sans pénalité énergétique importante.

- De par sa nature flexible, le système RξHP² peut s'adapter aux besoins de différentes catégories d'automobiles ou de véhicules utilitaires tels les camionnettes ou les autobus. En fait, un grand nombre d'applications secondaires sont envisagées pour des versions simplifiées du système : le chauffage des cabines de locomotive, la gestion climatique des véhicules motorisés ou des bateaux de plaisance, etc.

- Le système intégré assure une autonomie optimale des accumulateurs électriques, jusqu'à -25 °C où l'on maintient 65 % et 78 % de l'autonomie nominale (suivant l'accumulateur) et ce, tout en assurant le chauffage de la cabine et de l'air frais.

De plus, le système permet de maintenir un confort, un renouvellement d'air et un dégivrage de vitres, et ce, même à des températures inférieures à -20 °C sans utilisation de carburant fossile.

En définitive, le système RξHP² rencontre les cibles de performance établies. Il reste toutefois divers éléments à optimiser :

- le volume du système, qui devrait pouvoir être réduit de près de 15 %;
- le mode d'alimentation de puissance, pour le compresseur de vapeur de fréon;
- la stratégie de contrôle du système, pour assurer un mode d'opération quasi invisible pour l'utilisateur et une puissance de chauffage toujours optimale.

EXECUTIVE SUMMARY

The use of electric vehicles (EVs) is of key importance in meeting the vital objectives of improved air quality defined at Kyoto in 1997. The large-scale use of EVs is still hampered by various obstacles, notably their range and price. In particular, EVs by nature are vulnerable to extreme climate conditions. In cold climates, such as Canada and the northern United States, heating and ventilation loads directly affect EV range and performance. Unlike internal combustion engine vehicles, EVs lack sufficient energy sources to run thermal comfort systems. Because of their efficiency in transforming electric energy into motor power, there is little rejected heat energy left over for air and cab heating.

To date, although some systems have improved in some respects, there is no tangible, environmentally clean solution available on the market for all of the shortcomings related to operating EVs in cold climates. In the first phase of this project, carried out with the support of Transport Canada's Transportation Development Centre, a technical feasibility study demonstrated that a new technology, the RξHP^2 concept, had the potential to solve the problem in question. This project to develop the RξHP^2 technology was carried out with the close collaboration of various partners. In addition to the Groupe Énerstat Inc. team, responsible for overall RξHP^2 system development, the following key partners participated: Innergytech Inc. (Venmar), SMIS R&D Inc (CMAC Inc.), Caron et Fils Inc., Groupe THERMAUS and the Canada Centre for Mineral and Energy Technology (CANMET) Energy Diversification Research Laboratory (CEDRL) of Natural Resources Canada.

The RξHP^2 concept offers a solution that does not produce polluting emissions and that combines a heat pump with a heat storage unit as its central component. Heat management for the EV as a whole is made possible by integrating various innovative technologies, such as:

- Compact air exchanger
- Phase-transformation storage
- Passive regenerator

Essentially, the stale air drawn from the vehicle cab goes through a regenerator, which reheats incoming fresh air while recovering most of the energy of the outgoing stale air. This intake of fresh air can also reduce the need to defrost the cab windows. A heat pump condenser is placed in series with the regenerator. The regenerator's function is to increase the temperature of the fresh air to make up the remainder of the heating load.

The high-performance heat pump consists of an evaporator equipped with a heat accumulator. The heat accumulator operates on the basis of heat storage through the fusion of phase change material (PCM). Despite substantial fluctuations in climatic conditions, the heat storage unit helps to stabilize the heat pump's performance. The entire system is therefore able to maintain comfortable conditions throughout the heating season.
The project's technical objectives, which focussed specifically on the thermal comfort of EV users, consisted of the following:

- Maintain thermal comfort conditions for EV users in cold climates while affecting vehicle range as little as possible and using environmentally clean technology to eliminate the use of fuels for heating purposes.
- Maximize heat pump performance while minimizing impact on vehicle range.
- Reduce system weight and volume.
- Reduce expected cost of system.

During the project, the RξHP^2 system was developed in 1998 and 1999, and manufactured and tested at CEDRL in 1999 and 2000. It was then installed in a postal vehicle for road testing in 2000. It was also tested in 2001 in an Environment Canada climatic chamber for vehicles.

The main developments carried out targeted the following three system components:

1. Regenerator (technology partnership involving Innergytech/Venmar and Énerstat): The regenerator helps provide a continuous flow of fresh air to the vehicle without consuming too much energy and while ensuring good interior air quality and dehumidification of between 0.62 L/h and 0.93 L/h of water (with a flow of 70 cu. ft./min (2 m^3/min) for external temperatures varying between 0°C and –20°C). Consequently, coupling with a drying agent did not prove necessary for heating applications. The current regenerator provides a nominal performance of about 75 percent, which means that 75 percent of available heat in the stale air of the cab is recovered.

   In short, the result in terms of efficiency per volume is 75 percent of performance for an exchange volume of 0.4 cu. ft. (0.0113 m^3). This result compares favourably with conventional plate heat exchangers, which provide 70 percent efficiency for about 1.0 cu. ft. (0.028 m^3) or, in the case of a compact exchanger, 82 percent for 0.7 cu. ft. (0.020 m^3).

2. Accumulator (technology partnership involving Caron et Fils and Énerstat): An accumulator integrated with an evaporator (accumulator with direct expansion coolant) is itself an innovation. Its performance compares favourably with the existing heat storage system: 95 percent of mass utilization efficiency (compared with 60 to 80 percent for typical ice banks) and a PCM that provides 330 kJ/kg (compared with 200 to 300 for other PCMs). This accumulator is integrated with the heat pump's vapour compression unit (see Figure 1).

Figure 1 Installed compression unit

3. Control system (technology partnership involving SMIS R&D/CMAC and Énerstat): This fully programmable microcontroller and measurement station (interior conditions, outside conditions and operating conditions), with digital sensors (temperature, voltage and humidity) and control of thermomechanical components on a "bus," can support the automobile environment and the electrical noise of electric propulsion components (currently under validation), and can be hooked up to a remote computer (see Figure 2).

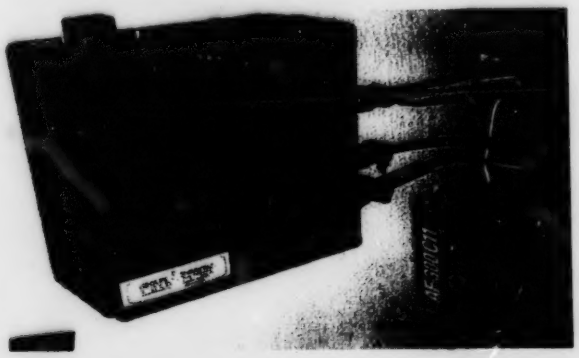


Figure 2 Installed control unit

Other developments included the following:

- Optimization of the refrigeration cycle, including an intensive study of coolant choices (from a selection of azeotrope and non-azeotrope coolants).
- Operation/comparison of precalibrated orifices, including a needle valve or thermostatic expansion valve for coolant expansion.
- Work on the hydronic circuit to maintain battery temperature only.
- Integration (and non-juxtaposition) of four advanced technologies (heat pumps, regeneration, PCM-enabled storage and digital control strategy).

Tests carried out at between 0°C and –30°C at CEDRL showed that the system responds well to changes in outside temperature conditions. The power provided by the current system is about 2.5 kW (i.e., a compressor consumption of between 700 and 800 W for a coefficient of performance usually varying between 2.5 and 2.9). Typical accumulator discharge time is about three hours at full capacity without any input from auxiliary heat sources (such as heat rejection from the electric battery). According to studies by A.D. Little,[3] the system, with minimal external input (less than 1 kW, or about 20 percent of available heat rejection in the entire vehicle), would be able to operate at full capacity for the duration of the tests (i.e., over four hours) and the heat accumulator would still be able to provide energy at the same intensive rate.

The measurements showed that the RξHP^2 system provides similar nominal power at 0°C and –15°C. This special characteristic for a heat pump was obtained by integrating the heat storage unit with the cooling system. Tests clearly demonstrated the effectiveness of the principle. A slight decrease was noticed in the heat provided to the cab. This was expected and can be corrected through greater heat storage, which will also increase the system's operating range.

COP[4] results at very low temperatures were remarkable. Cab heat recovery and heat storage in the PCM were determining factors in this performance.

Figure 3 shows that system performance increases when the temperature falls. The heating power remained relatively unchanged, but the compressor's energy consumption decreased noticeably when the temperature fell. This characteristic gives the system an advantage over other energy sources. Competitors' systems are essentially conventional air-to-air heat pumps whose performance diminishes as temperatures fall. There is one exception – the system being developed by Valeo – which has had interesting results down to –10°C with the use of an electric compressor (e-compressor). The RξHP^2 system's energy consumption is relatively stable in all weather conditions, whereas the power output drops when the temperature rises.

---

[3] Arthur D. Little, *Electric Vehicle Thermal Management for Cold Weather Operation* (Cambridge, MA: Northeast Alternative Vehicle Consortium, 1994).

[4] Coefficient of Performance (heat obtained in relation to electric energy input).
Heating power: average energy rate in kW provided by the system during the overall test.
Power consumption: overall electric energy consumption of the system (including fans, compressor, relays and valves, electrical components, etc.).

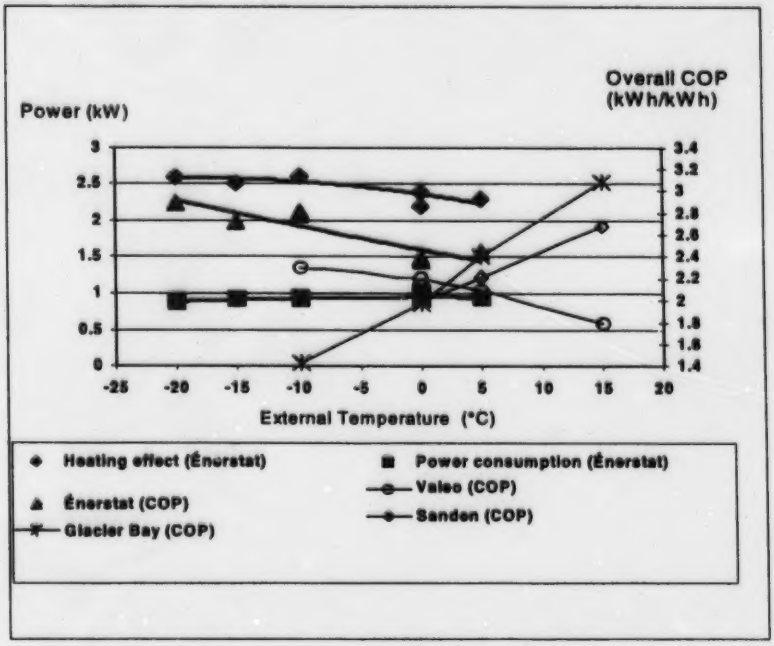


Figure 3 Effect of external temperature on performance

In addition to the laboratory tests conducted at CEDRL, measurements were taken with the system installed in a Canada Post vehicle. These measurements were performed in July 2001 in a climatic chamber at Environment Canada's Emissions Research and Measurement Division in Ottawa. From the results, a COP of about 3.0 was calculated for a heating power of 2.2 kW. Performance was similar to results obtained at CEDRL (2.5 kW), although the heating power was slightly lower.

The results obtained with the postal vehicle at –10°C and at –20°C in the climatic chamber showed the same trends as previously mentioned in terms of heating power and system performance. In addition, the storage time was found to be between three and four hours of continuous use (without interruption), representing between six and eight hours of average operation (intermittent operation).

The results were used to look at system behaviour and performance. The system's performance improves when the temperature falls, a characteristic that gives the system an advantage over other energy sources. Energy consumption is relatively stable in all climatic conditions, whereas power output drops when the temperature rises. Table 1 shows the performance targets and results obtained during climatic chamber tests.

Table 1 ***Climatic Chamber Vehicle Testing Performance Targets and Results***

Objective	*Targets* (1998)	External Temp.	Test Results	External Temp.	
Vehicle range	60%	at –20°C	N/A	at –20°C	% of range in km at +20°C
Accumulator capacity	75%	at –25°C	N/A	at –25°C	% of capacity in W/h at +20°C
Comfort	T_a 10°C T_{dp} 0°C	at –20°C	T_a 13.5°C T_{dp} –10°C	at –10°C	for all outside conditions above –20°C and below 0°C
Heat pump COP	2.0 2.5	at –20°C at 0°C	2.9 2.5	at –20°C at 0°C	COP above 2.5 between 0°C and –20°C
Unit cost	$6,000		$5,650		by prototype; targeted production cost < $2,500
Compactness	0.2 m³		0.22 m³		overall system volume for a car

T_a = Ambient Temperature T_{dp} = Dew Point

Overall, the results were very satisfactory for refrigeration systems at such temperatures. However, optimization work must be carried out to ensure maximum system performance.

All things considered, the project helped to validate the concept developed over five years ago by the Groupe Énerstat team. Using the RÉHP² in EVs operating in cold climates resulted in the following advantages:

- System performance is less dependent on weather conditions. Unlike regular air-to-air heat pumps, the RÉHP² can operate in temperatures as low as –25°C without a significant decline in performance, while meeting all of the vehicle's heating and ventilation load requirements. The coupling of the regenerator with the heat storage unit makes it possible to stabilize the operating temperatures of the heat pump's hot and cold sources.
- Energy regeneration facilitates continuous air renewal in the cab to ensure optimal air quality and efficient defrosting of glass surfaces without significant energy loss.
- Because of its flexibility, the RÉHP² system can be tailored to the requirements of various classes of automobiles and utility vehicles, such as vans and buses. Many secondary applications are being considered for simplified versions of the system, including locomotive cab heaters and climate control for motor vehicles and recreational watercraft.
- The integrated system provides optimal range for electric accumulators in temperatures as low as –25°C, where between 65 and 78 percent of nominal range (depending on the accumulator) is maintained while providing heating and fresh air to the cab.

The RÉHP² system maintains comfort, renews air and defrosts windows, even at temperatures below –20°C, without using fossil fuels.

Generally speaking, the RξHP^2 met the established performance targets. However, various elements such as the following still require optimization:

- System volume, which should be able to be reduced by 15 percent;
- Power input mode for the freon gas compressor; and
- System control strategy to provide a mode of operation that is almost invisible to the user and that continuously provides optimal heating power.

TABLE DES MATIÈRES

1 CONTEXTE 1
- 1.1 Problématique 1
- 1.2 Solution RÉHP^2 2
- 1.3 Objectifs techniques du projet 4
- 1.4 Planification du projet 4

2 DESCRIPTION DES TRAVAUX 5
- 2.1 Développement et analyse - Modélisation et analyse (Étape 1a) 5
  - 2.1.1 Régénérateur passif 5
  - 2.1.2 Stockage à changement de phase 6
  - 2.1.3 Échangeur à air compact 7
  - 2.1.4 Modélisation numérique du système global 7
- 2.2 Conception du système (Étape 1b) 9
  - 2.2.1 Circuit de la thermopompe 9
  - 2.2.2 Circuit de ventilation 9
- 2.3 Conception d'un banc d'essais (Étape 2a) 10
- 2.4 Fabrication des prototypes (Étape 2b) 11
  - 2.4.1 Régénérateur 12
  - 2.4.2 Condenseur de la pompe à chaleur 12
  - 2.4.3 Accumulateur 13
  - 2.4.4 Contrôle 14
- 2.5 Tests expérimentaux (Étape 2c) 16
  - 2.5.1 Première série d'essais au LRDEC 16
  - 2.5.2 Deuxième série d'essais au LRDEC 16
  - 2.5.3 Troisième série d'essais au LRDEC 17
  - 2.5.4 Quatrième série d'essais pour le prototype intégré dans un véhicule de Postes Canada 19
- 2.6 Révision et itérations (Étape 3) 20

3 RÉSULTATS 21
- 3.1 Résultats des tests complétés au LRDEC 23
- 3.2 Résultats des tests complétés sur le camion postal électrique 27

4 DISCUSSIONS 30

5 CONCLUSIONS 31

BIBLIOGRAPHIE 32

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Coefficient de performance du système en fonction de la température extérieure	8
Figure 2	Température de l'habitacle en fonction de la température extérieure	9
Figure 3	Détail de l'instrumentation	10
Figure 4	Photo du montage, incluant le simulateur de l'habitacle	11
Figure 5	Régénérateur isolé	12
Figure 6	Condenseur et support	13
Figure 7	Système de contrôle électronique	14
Figure 8	Banc d'essais en cours de tests	16
Figure 9	Installation du système dans le véhicule électrique	19
Figure 10	Unité de contrôle installée	19
Figure 11	Unité de compression installée	20
Figure 12	Chambre climatique d'Environnement Canada à Ottawa	21
Figure 13	Évolution de la capacité d'échange thermique du régénérateur	22
Figure 14	Évolution de la puissance du système à 0 °C et à -15 °C	24
Figure 15	Effet de la température extérieure sur la performance	25
Figure 16	Véhicule utilisé pour l'implantation	27
Figure 17	Évolution de la température en fonction du temps (-10 °C)	28
Figure 18	Évolution de l'énergie utilisée en fonction du temps (-10 °C)	28
Figure 19	Évolution de la température en fonction du temps (-20 °C)	29
Figure 20	Évolution de l'énergie utilisée en fonction du temps (-20 °C)	29

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Principales étapes du projet	4
Tableau 2	Variables de contrôle du système	15
Tableau 3	Résumé des essais	18
Tableau 4	Cibles de performance et résultats expérimentaux sur véhicule en chambre climatique	26

1 CONTEXTE

1.1 Problématique

Les véhicules électriques (VÉ) représentent une question d'importance pour atteindre les objectifs vitaux d'amélioration de la qualité de l'air qu'ont définis les différents sommets internationaux (Kyoto, 1997; Rio, 1992). Déjà, plusieurs États se sont donnés une réglementation à l'effet de favoriser, voire d'inciter la production et la vente de véhicules sans émissions polluantes, les ZEV (*Zero Emission Vehicle*) : le Japon, la France, les États-Unis (notamment les États de la Californie, de New York et du Massachusetts), la Suisse et plusieurs autres.

Le déploiement des VÉ à grande échelle se bute encore à différentes embûches, particulièrement à l'autonomie des VÉ et à leur prix. Qui plus est, de par leur nature, les véhicules électriques sont vulnérables aux conditions climatiques extrêmes. Particulièrement, dans les climats froids, comme ceux du Canada ou du nord des États-Unis, les charges de chauffage et de ventilation affectent directement l'autonomie et la performance du VÉ[1]. Mais aussi, les accumulateurs électriques perdent une grande partie de leur capacité à basse température. Contrairement aux véhicules à moteur à combustion interne (VMCI), les véhicules électriques ne disposent pas de source d'énergie suffisante pour alimenter les systèmes de confort thermique[2]. Dans le cas des VÉ, en quelque sorte prisonniers de leur efficacité à transformer l'énergie électrique en traction motrice, peu d'énergie thermique est rejetée et disponible pour le chauffage de l'air et de l'habitacle.

Deux études de Arthur D. Little (1991 et 1994) et une étude du Northeast Alternative Vehicle Consortium - NAVC (1996) ont démontré que les climats froids occasionnent trois grandes difficultés pour l'opération des VÉ :

- Le besoin d'énergie pour le chauffage de l'air et le dégivrage des vitres, qui réduit l'énergie disponible pour le déplacement;
- Les pertes de capacité et de durabilité des accumulateurs à basses températures;
- L'augmentation des pertes d'énergie liées à la viscosité du lubrifiant du système de propulsion et à la résistance à la traction, notamment pour ce qui est des pneus.

Toutes ces difficultés résultent de pertes d'autonomie significatives pouvant descendre à moins de 15 % de la capacité nominale, selon une étude de General Motors - GM sur la EV1 (1994). Toutefois, la moitié des pertes d'autonomie sont typiquement causées par les conditions thermiques des accumulateurs, tandis que plus de 30 % sont causées par les fonctions de chauffage et de dégivrage.

---

[1] Voulant décourager une généralisation des VÉ, certains intervenants, particulièrement, en provenance du secteur manufacturier traditionnel, soulignent parfois les problèmes liés aux climats comme raison de ne pas favoriser l'émergence de ces véhicules (NAVC, 1996).

[2] Il importe de souligner que l'opération en climats froids dégrade la performance de pratiquement tous les types de véhicules; même les VMCI présentent un rendement inférieur à basse température.

Touchant les deux premiers aspects, la gestion thermique du VÉ devient donc un enjeu important et reconnu par beaucoup d'intervenants, puisqu'elle a un impact majeur sur l'autonomie du VÉ et sur son acceptation par les utilisateurs. À ce jour, même si quelques systèmes offrent une amélioration de certains points, peu d'entre eux apportent des solutions tangibles à l'ensemble des inconvénients liés à l'opération des VÉ en climats froids. Le peu de systèmes concernés ne touche qu'à une partie du problème : le chauffage de l'habitacle, le renouvellement efficace de l'air ou la gestion thermique des accumulateurs électriques. En conformité avec les conclusions de l'étude de Arthur D. Little (1994), des technologies novatrices pourront permettre de résoudre plus adéquatement les problèmes liés à l'opération des VÉ en climats froids.

Comme mentionné plus haut, les VÉ ne disposent pas d'une source d'énergie suffisante pour fournir la puissance nécessaire au système de chauffage, mais d'un ensemble de sources potentielles :

- les pertes thermiques de la chaîne de traction sont disséminées dans les véhicules (moteur, batteries, contrôle électronique et variateur de puissance) et leur puissance est assez faible (2 kW en pointe) et aléatoire (nulle à l'arrêt et maximale au freinage);
- le renouvellement d'air, pour assurer un apport d'air frais dans les véhicules et pour permettre un dégivrage efficace des fenêtres de la cabine, occasionne une évacuation d'air vicié ayant un contenu énergétique important;
- les accumulateurs électriques représentent la grande majorité de l'énergie embarquée et peuvent générer des pertes thermiques (en opération), mais aussi des demandes d'énergie (pour maintenir leur capacité à l'arrêt).

1.2 Solution RξHP²

Le concept RξHP² propose une solution qui combine l'utilisation d'une pompe à chaleur avec stockage comme noyau central. La gestion thermique de l'ensemble du VÉ est rendue possible par l'intégration de différentes technologies novatrices telles :

- un échangeur à air compact,
- un stockage à changement de phase,
- un régénérateur passif.

Le concept envisagé fonctionne de la façon suivante. Dans un premier temps, l'air vicié évacué de l'habitacle du véhicule passe à travers un régénérateur. Ce régénérateur permet de réchauffer l'air frais provenant de l'extérieur tout en récupérant une grande partie de l'énergie de l'air vicié évacué. Cet apport d'air frais permet aussi de diminuer le besoin de dégivrage des glaces de l'habitacle. Cependant, la quantité d'énergie récupérée par le régénérateur n'est pas suffisante. De par sa nature, le régénérateur ne peut que combler une partie des pertes de chaleur causées par la ventilation.

Par conséquent, le condenseur d'une thermopompe est placé en série avec le régénérateur. Ce dernier a pour fonction d'augmenter la température de l'air frais à un niveau qui comble l'ensemble de la charge de chauffage.

D'autre part, la thermopompe est composée d'un évaporateur muni d'un accumulateur thermique. Le fonctionnement de ce dernier est basé sur le stockage de chaleur par la fusion d'un matériau à changement de phases (MCP). Malgré les fluctuations importantes des conditions climatiques, le stockage permet de stabiliser le rendement de la thermopompe. L'ensemble du système est donc en mesure de maintenir des conditions de confort tout au long de la saison de chauffage.

Dès la phase précédente, l'étude de faisabilité technique, aussi réalisée avec l'appui du Centre de développement des transports de Transports Canada, le projet a été mené à bien grâce à l'étroite collaboration de divers partenaires. En plus de l'équipe du Groupe Énerstat inc., responsable du développement général du système RξHP^2, les différents partenaires du présent projet participant à la mise en œuvre et à l'implantation du système étaient :

Innergytech inc. La compagnie Innergytech se spécialise dans la production d'échangeurs de chaleur de type air/air utilisés dans les ventilateurs à récupération de chaleur. Innergytech est responsable de la production du régénérateur du système RξHP^2.

SMIS R&D inc. (CMAC inc.). Entreprise de développement et de production de systèmes électroniques de haute technologie. Cette multinationale canadienne a été responsable du développement du système de contrôle du RξHP^2. De plus, CMAC inc. a déjà des clients dans le secteur automobile, particulièrement avec un des trois grands manufacturiers américains. Cette expertise pourra certainement être mise à contribution dans une phase ultérieure de préproduction.

Caron et Fils inc. À titre de spécialiste dans la production d'échangeurs de chaleur de type liquide/air, Caron et fils inc. a été responsable de la fabrication des prototypes du condenseur et de l'accumulateur.

Groupe THERMAUS (Université de Sherbrooke). Le Groupe de recherche en thermique et en aérodynamique de l'Université de Sherbrooke, de réputation internationale, a réalisé dans le cadre du projet des travaux de modélisation du système. Un professeur-chercheur et un étudiant à la maîtrise ont été responsables des activités de modélisation.

LRDEC. L'expertise en énergétique des chercheurs du Laboratoire de recherche en diversification énergétique du CANMET est reconnue au niveau international. Le support scientifique du LRDEC tout au long du projet, et plus particulièrement pour le développement du réfrigérant, de même que pour l'élaboration et l'opération du banc d'essais dans les laboratoires du LRDEC représente un précieux atout pour l'ensemble du projet.

Outre leur responsabilité respective dans le projet, ces partenaires ont participé activement au développement et à l'intégration du système intégré RξHP^2. Cette synergie pourra être exploitée dans la production future du RξHP^2 pour maximiser les retombées technologiques.

1.3 Objectifs techniques du projet

Les objectifs techniques du projet ciblent particulièrement le confort thermique de l'utilisateur d'un VÉ, il s'agit donc :

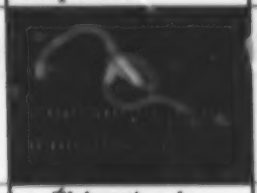
- de maintenir des conditions de confort thermique pour l'utilisateur d'un VÉ par climat froid en respectant les contraintes économico-écologiques suivantes :
  - affecter le moins possible l'autonomie du véhicule,
  - utiliser une technologie écologiquement propre; donc, éliminer l'utilisation de combustibles pour les fonctions de chauffage,
- de maximiser la performance de la thermopompe en minimisant les impacts sur l'autonomie du véhicule;
- de réduire le poids et le volume du système;
- de réduire le coût attendu du système.

À la section 3 (Résultats), les objectifs techniques quantifiés sont comparés aux résultats obtenus.

1.4 Planification du projet

Les principales étapes du projet sont présentées dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Principales étapes du projet

Étape 1a		Étape 1b		Étape 2a	
	➡		➡		➡
• Développement des simulateurs • Analyse des performances		• Élaboration du cahier de charges • Intégration finale des composantes • Design thermique et mécanique • Recherche de brevets apparentés • Plans et devis		• Élaboration du cahier de charges • Plans et devis • Construction • Tests de calibration du banc d'essais • Élaboration du protocole d'essais	

	Étape 2b		Étape 2c		Étape 3
➡	[redacted]	➡	[redacted]	➡	[redacted]
	• Accumulateur thermique • Condenseur • Régénérateur • Contrôle • Autres composantes • Assemblage		• Tests sur les composantes en laboratoire • Implantation et mise en service - tests sur route		• Optimisation du système • Implantation du système dans un véhicule • Amélioration thermo-mécanique du système intégré • Mise en service

2 DESCRIPTION DES TRAVAUX

2.1 Développement et analyse - Modélisation et analyse (Étape 1a)

Les tâches de modélisation de la phase de développement avancé ont été réalisées par l'équipe du Groupe THERMAUS de l'Université de Sherbrooke en collaboration soutenue avec l'équipe du Groupe Énerstat.

La modélisation et l'analyse des principaux éléments du système RξHP^2 sont résumées dans la section qui suit.

2.1.1 Régénérateur passif

Dans la modélisation et l'analyse des performances du régénérateur passif, les points suivants ont été considérés :

- la surface d'échange : La performance du régénérateur est directement liée à la surface d'échange thermique entre deux écoulements d'air.
- la vitesse d'écoulement : La vitesse d'écoulement a également une importance considérable sur le rendement d'un échangeur, selon que les écoulements se trouvent en régime laminaire ou turbulent. Ce type d'échange thermique est qualifié de transfert par convection.
- le type de matériaux : Le type de matériaux intervient ici dans le transfert de chaleur par conduction (ailettes et isolant). Le type de matériau a donc lui aussi un impact sur le rendement global de l'échangeur.

- les pertes de charges (ΔP) : Les vitesses d'écoulement et les surfaces d'échange ont un impact direct sur les pertes de charge générées par l'écoulement dans l'échangeur passif. Toutes les pertes de charge dans un réseau de ventilation doivent être considérées afin de s'assurer que le ventilateur pourra compenser ces pertes de charge et assurer l'écoulement d'air requis.

Tous ces points sont interreliés; la modélisation et l'optimisation des performances doivent tenir compte de ces principaux points de conception.

2.1.2 Stockage à changement de phase

Le stockage à changement de phase permet de maximiser l'énergie disponible dans un matériau. L'énergie stockée dans un matériau est beaucoup plus importante entre l'état solide et liquide ou entre l'état liquide et gazeux pour un même matériau que l'énergie disponible entre deux températures pour un même état. L'utilisation d'un matériau à changement de phase nous permet donc de minimiser la masse de stockage requise pour atteindre les objectifs d'autonomie du système.

On doit par contre modéliser le comportement du matériau en fonction des actions de stockage et de déstockage. Pour effectuer ces fonctions, on doit utiliser ici encore un échangeur intégré dans le matériau à changement de phase. La modélisation et l'analyse du comportement de cet échangeur devient un point important de la conception du système.

Les points suivants sont principalement considérés dans cette modélisation :

- la masse de matériau : La masse de matériau à changement de phase requise est directement liée à l'énergie nécessaire en fonction de l'autonomie désirée.
- le volume du matériau : Selon la sélection de matériau et la masse requise, on détermine le volume de stockage.
- la surface de l'échangeur : En fonction de l'énergie requise pour l'utilisation (watts), on doit déterminer la surface et le circuit de l'échangeur. Comme nous insérons l'échangeur dans un matériau à changement de phase, le rendement de l'échangeur sera une fonction temporelle. On doit donc optimiser le rendement de l'échangeur sur toute la période de stockage et de déstockage. On doit donc concevoir l'échangeur en fonction de la surface d'échange, du type de matériau, de la configuration de l'échangeur et du circuit de l'échangeur.

- le mode de stockage et déstockage :

  Selon l'utilisation du système, le mode de recharge du véhicule et le mode de stockage et de déstockage du système impliquent l'intégration d'un deuxième échangeur dans le matériau à changement de phase. Cet échangeur doit également être optimisé et les principaux éléments de conception sont : la surface d'échange, le type de matériau, la configuration de l'échangeur et le circuit de l'échangeur.

2.1.3 Échangeur à air compact

Afin d'assurer le conditionnement de l'air alimenté dans l'habitacle, en mode chauffage ou en mode climatisation, le débit d'air doit circuler dans un échangeur à air compact qui lui fournit ou en extrait de l'énergie. Ici encore, les principaux points de conception sont :

- le débit d'air : La quantité d'air que l'on doit faire circuler pour assurer le confort de l'habitacle et le dégivrage des vitres en hiver.
- la capacité de l'échangeur :

  La capacité thermique de l'échangeur est déterminée par les charges de ventilation, les charges thermiques du véhicule (pertes/gains thermiques, gains solaires).
- le type d'échangeur :

  Le type d'échangeur est fonction du médium d'échange thermique (circuit de réfrigérant ou circuit de glycol), des pertes de pression maximales acceptables dans l'écoulement d'air et du volume maximum que peut occuper l'échangeur en fonction des contraintes physiques du véhicule.

2.1.4 Modélisation numérique du système global

Suivant l'objectif de prédire le comportement du système au complet, une modélisation numérique a été effectuée. Le modèle est basé sur un découpage modulaire du système. Diverses méthodes (différences finies, modélisation semi-empirique, équations algébriques) sont utilisées pour modéliser les différentes composantes du système, soit le compresseur, le condenseur, l'accumulo-évaporateur, la valve d'inversion, la valve de détente et l'habitacle.

Les variables de sortie d'une composante modélisée deviennent les variables d'entrée pour d'autres. L'agencement des différents modules décrit un important système d'équations non-linéaires résolu par une méthode de Newton à l'aide du logiciel EES (Engineering Equation Solver). Le système est modélisé en régime quasi-permanent et le changement de phase, les pertes de pression ainsi que la masse du réfrigérant dans les échangeurs sont prises en considération.

Le modèle permet de prédire en fonction du temps les puissances thermiques transférées, la masse de glace produite et la température de l'habitacle. L'impact de plusieurs paramètres, comme la température extérieure et la présence de la valve d'inversion, a été observé à l'aide de simulations spécifiques. Les résultats du modèle démontrent entre autre que le coefficient de performance du système peut atteindre des valeurs supérieures à 4,0 et augmente en fonction d'une diminution de la température extérieure. Les figures 1 et 2 montrent le coefficient de performance (COP) et la température de l'habitacle en fonction de différentes températures extérieures.

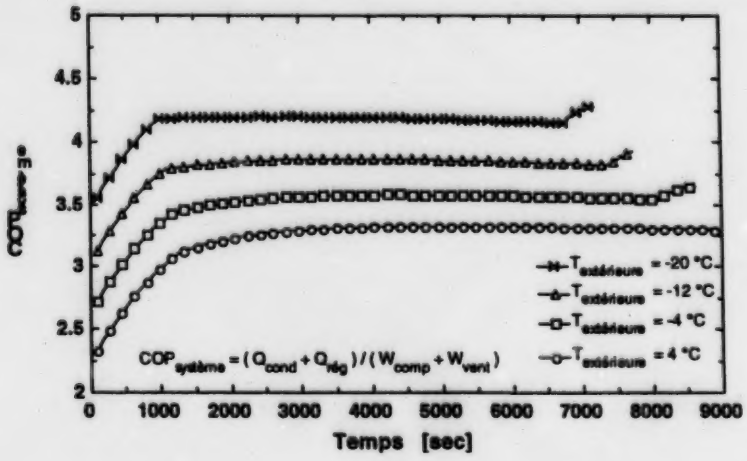


Figure 1 ***Coefficient de performance du système en fonction de la température extérieure***

[charge de chauffage établie suivant un coefficient global de transfert de chaleur de 37 W/K pour les pertes de l'enveloppe et de 52 W/K pour la charge de ventilation, véhicule de type camionnette, vitesse moyenne de 20 km/h, puissance du système de 3,0 kW]

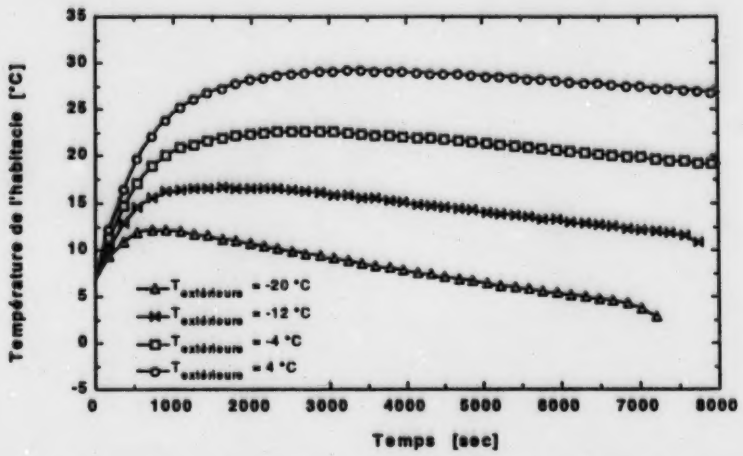


Figure 2 ***Température de l'habitacle en fonction de la température extérieure***

[même condition que la Figure 1]

2.2 Conception du système (Étape 1b)

À la suite de la modélisation et de l'analyse de chacune des composantes du système, l'intégration de chaque composante dans un ensemble implique une réévaluation constante des interactions entre chaque élément du système. La conception du système RξHP^2 implique la conception de deux circuits différents : le circuit de la thermopompe et le circuit d'air.

2.2.1 Circuit de la thermopompe

Un circuit de la thermopompe intègre un compresseur, un échangeur/condenseur, une valve de détente et, enfin, un autre échangeur/évaporateur. La conception de ce système demande une analyse des charges, pour chacun des échangeurs, la sélection d'un compresseur qui nous permet d'atteindre les conditions d'opération optimales pour chacun des échangeurs.

2.2.2 Circuit de ventilation

Dans le système RξHP^2, le circuit de ventilation comprend le régénérateur passif, l'échangeur compact, les ventilateurs d'apport d'air frais et d'évacuation et le système de distribution. Le régénérateur passif permet de réduire la puissance requise à l'échangeur. La conception de ce système implique l'implantation de tous les conduits de ventilation, l'intégration du régénérateur dans le circuit de ventilation, l'installation des ventilateurs, l'évaluation des pertes de pression générées dans l'ensemble du circuit, l'intégration de l'échangeur compact.

2.3 Conception d'un banc d'essais (Étape 2a)

La planification d'un banc d'essais pour des essais réalisés aux laboratoires LRDEC du ministère des Ressources naturelles du Canada a débuté en mars 1999 et le démarrage du projet a eu lieu en avril de la même année.

Les étapes suivantes ont été franchies lors de cette phase du projet :

- la détermination des requis en termes de services pour ce qui est du banc d'essais, de la collection de données, des interventions *in situ*;
- l'élaboration d'une analyse des risques et des procédures à suivre lors de l'opération du banc d'essais;
- l'élaboration d'un plan d'essais afin de couvrir l'ensemble des conditions d'opération;
- la définition des apports et implications des partenaires.

Le Groupe Énerstat inc. était alors responsable de fournir un prototype du type «*bread board*» incluant le régénérateur et la pompe à chaleur.

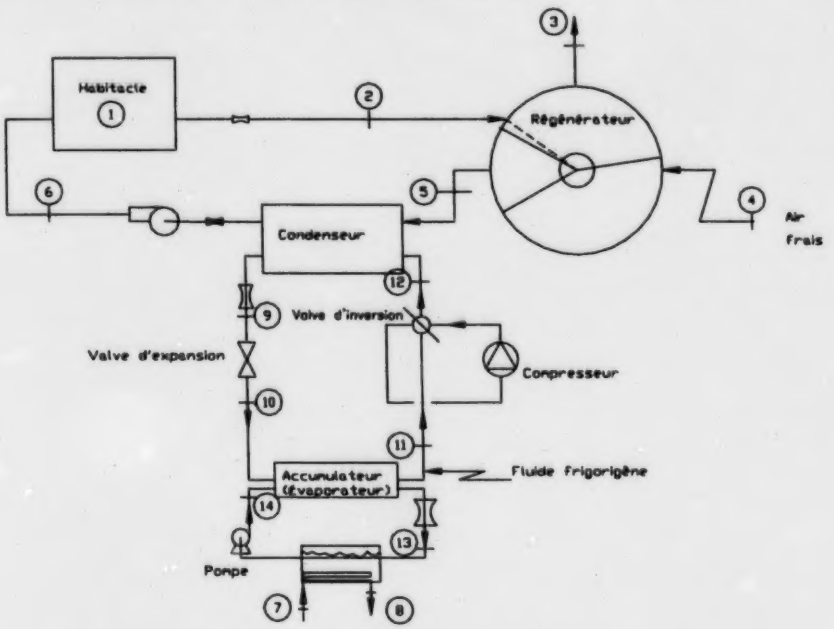


Figure 3 ***Détail de l'instrumentation***

Le système-prototype sur banc d'essais comprenait quatre composantes principales :

#1 L'habitacle simulé, qui générait des pertes de 37 W/K;
#2 et #5 Le régénérateur, qui récupère l'énergie de l'air vicié (2) pour récupération vers l'air frais (4);
#2 et #8 La boucle, qui simule les pertes thermiques de l'accumulateur électrique;
#9 et #14 La thermopompe, incluant évaporateur et condenseur;

Le LRDEC était responsable de développer et d'opérer un banc d'essais (voir Figure 3) comprenant trois composantes principales : le simulateur de l'habitacle, qui simulait les conditions intérieures du véhicule, le simulateur de batteries, qui simulait la charge thermique d'une enceinte de batteries, puis le support principal du prototype ainsi que le système de contrôle et d'acquisition de données. La Figure 4 montre le montage incluant le simulateur d'habitacle, le simulateur de batteries dans la chambre climatique simulant l'extérieur et le système d'acquisition de données. La plage d'opération de la chambre climatique se situe entre -40 °C et +40 °C.

Figure 4 ***Photo du montage, incluant le simulateur de l'habitacle***

2.4 Fabrication des prototypes (Étape 2b)

La fabrication des prototypes s'est échelonnée sur une longue période et plusieurs générations de prototypes ont ainsi vu le jour. Chaque composante du système a été optimisée en cours d'essais.

2.4.1 Régénérateur

La première génération du régénérateur a été celle issue du design initial (en forme de beigne). Il assurait des rendements très intéressants mais se butait à un problème d'étanchéité et à un niveau élevé de complexité dans la fabrication.

Une deuxième génération de régénérateur a donc été conçue (rectangulaire *«counterflow»* avec 2 sorties). Le nouveau concept se rapprochait le plus possible des avantages technologiques du design initial en minimisant les problématiques au niveau de l'étanchéité et de la fabrication en adoptant une méthode de fabrication traditionnelle pour ce type d'échangeur.

La deuxième génération se butait cette fois à un problème fonctionnel d'intégration, du moins, si l'on voulait respecter nos objectifs de miniaturisation.

La troisième génération de régénérateur a ainsi vu le jour (rectangulaire *«counterflow»* avec une sortie). La problématique au niveau de l'intégration ainsi résolue, nous avons toutefois observé un manque au niveau de l'optimisation énergétique, lequel a facilement été corrigé dans la quatrième et dernière génération du régénérateur.

Figure 5 ***Régénérateur isolé***

2.4.2 Condenseur de la pompe à chaleur

La première génération du condenseur était issue de la communion entre la première génération du régénérateur et du condenseur. Cette première génération de condenseur se butait également à un niveau de difficulté élevé du point de vue de la fabrication.

La deuxième génération du condenseur était donc issue de l'évolution du régénérateur et de l'objectif de se rapprocher d'un type de condenseur disponible sur le marché actuel.

Le condenseur choisi se rapprochait en tout point des types d'échangeurs de chaleur que l'on retrouve actuellement dans les véhicules, il présentait l'avantage d'être disponible. Toutefois, il ne rencontrait pas les objectifs de miniaturisation du projet.

La troisième génération du condenseur rencontrait donc les objectifs de disponibilité et de miniaturisation en conjuguant les dernières technologies au niveau des échangeurs à air compacts.

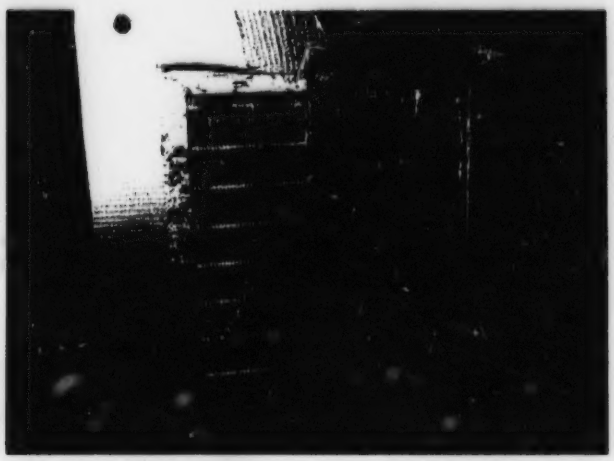


Figure 6 ***Condenseur et support***

2.4.3 Accumulateur

L'accumulateur représente un des éléments clés, mais aussi une difficulté majeure au plan de la conception.

La première génération de l'accumulateur était également issue d'un concept d'optimisation de la technologie d'un échangeur avec stockage thermique à changement de phase. L'accumulateur présentait toutefois un problème majeur au niveau de la fabrication.

Cette génération a donc été mise de côté pour permettre la conception de la deuxième génération d'échangeur, celui-ci se rapprochant plus d'un assemblage conventionnel. Les essais ont permis de constater que cet échangeur permettait une plus grande stabilité au niveau de l'opération du système. Les résultats sont très intéressants. Bien que sa fabrication est encore à ce jour de type artisanale, les technologies disponibles pourront permettre sa fabrication sur une base industrielle.

Le matériau à changement de phase utilisé rencontre tous les objectifs préliminaires au niveau du rendement et ne présente aucun risque au niveau écologique. Au cours des tests, les résultats ont montré que plus de 95 % de la chaleur stockée dans le matériau pouvait être récupérée et utilisée dans le système pour les fins du chauffage.

À ce jour, cette composante et particulièrement l'enveloppe (le réservoir) de l'accumulateur sont encore en développement. Des éléments doivent être améliorés pour en assurer la fiabilité à long terme et un ensemble commercial adéquat.

2.4.4 Contrôle

Le système de contrôle est l'une des réalisations importantes du projet. La collaboration de SMIS R&D (CMAC) a été importante à cet effet. Le contrôle du système doit permettre de contrôler le fonctionnement du système de thermopompe afin de contrôler la température de l'air amené à l'habitacle.

Figure 7 ***Système de contrôle électronique***

Un système de contrôle électronique avec plusieurs sondes de mesure des températures d'opération a été conçu. L'utilisateur a donc le choix de faire fonctionner le système en mode chauffage/climatisation et de présélectionner la température du confort qu'il désire maintenir dans l'habitacle. Le contrôle de la ventilation et de la capacité des échangeurs sera ainsi maintenu en fonction des conditions d'opération demandées par l'utilisateur.

Le tableau 2 présente les différentes variables prises en compte dans le contrôle, et qui sont stockées régulièrement pour permettre un suivi ou un autodiagnostic de l'opération du système.

Tableau 2 : Variables de contrôle du système

ENTRÉE	Variables d'entrée	Description
IP1	Mode	Mode sélectionné par l'utilisateur ☐ 1 : chauffage ☐ 2 : climatisation ☐ 3 : ventilation ☐ 4 : régénération
IP2	État	État du véhicule ☐ 1 : Décharge ☐ 2 : Arrêt ☐ 3 : Recharge
IP3	TE111	Température du réfrigérant à la sortie du compresseur (RTD – *Resistance Temperature Detectors* - de surface)
IP4	TE114	Température du réfrigérant à l'entrée du compresseur (RTD de surface)
IP5	TE121	Température dans le circuit à l'entrée de l'accumulateur
IP6	TE131	Température de l'air extérieur
IP7	TE136	Température de l'air à la sortie du condenseur
IP8	TE141	Température de l'air dans l'habitacle

2.5 Tests expérimentaux (Étape 2c)

Les tests expérimentaux se divisent en quatre étapes.

2.5.1 Première série d'essais au LRDEC

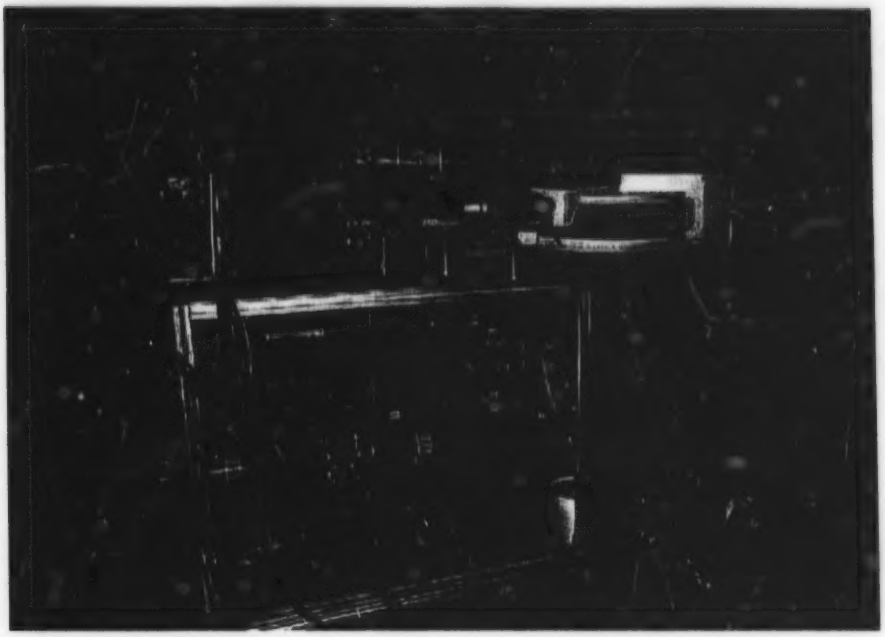


Figure 8 ***Banc d'essais en cours de tests***

La première série d'essais s'est échelonnée de septembre 1999 à la fin novembre 1999. Les essais ont été réalisés sur la première génération de toutes les composantes. Ils ont subitement pris fin en raison d'un incident indépendant du prototype lui-même, survenu aux laboratoires du LRDEC, pendant lequel quelques équipements du banc d'essais et de la chambre climatique ont été endommagés.

Pendant la première série d'essais, nous avons procédé à la mise en route de l'ensemble du banc d'essais ainsi qu'à la familiarisation avec les installations.

2.5.2 Deuxième série d'essais au LRDEC

La deuxième série d'essais s'est échelonnée de la fin janvier 2000 à la fin février de la même année. Les essais ont été réalisés sur un prototype intégrant la deuxième génération de régénérateur, de condenseur et de vanne d'expansion. L'évaporateur en était encore à sa première génération, mais il a toutefois été intégré à une deuxième génération d'accumulateur, qui nous permettait de mieux observer son comportement.

2.5.3 Troisième série d'essais au LRDEC

La troisième série d'essais a permis d'étudier le comportement de la deuxième génération d'évaporateur/accumulateur, qui, de par sa conception, était très différente de la première génération. Nous avons également intégré la troisième génération de condenseur à notre prototype. Tirant profit de cette série d'essais pour observer le rendement d'un régénérateur plus petit, nous avons apporté de légères modifications au design. Les résultats des tests en laboratoire sont présentés ci-après. Le tableau 3 présente un résumé des essais et note les points pertinents de chacun.

Tableau 3 : Résumé des essais

Numéro de l'essai	Température de la chambre	Commentaires
1	5 °C	
2	0 °C	– La puissance au condenseur est d'environ 2,2 kW. – Pour cet essai, la température de l'habitacle a été maintenue aux environs de 20 °C par l'apport de l'élément électrique. – L'évaluation du rendement du régénérateur nous indique une efficacité d'environ 85 %, mais une récupération de chaleur d'environ 130 watts. Il faut noter que le débit d'air du côté évacuation était particulièrement bas. – La puissance à l'accumulateur est d'environ 1,5 kW. – Les pertes dans le circuit de réfrigération semblent de l'ordre de 0,2 kW et seraient en partie dues à la vanne d'inversion.
3	-5 °C	
4	-10 °C	– La puissance au condenseur est d'environ 2 kW. – La puissance estimée à l'évaporateur est d'environ 1,7 kW. La capacité de l'évaporateur chute rapidement avec le glaçage des ailettes. – Le test a été effectué sans l'apport en énergie de l'élément chauffant d'appoint et la température dans l'habitacle a été impossible à maintenir. – La puissance récupérée au régénérateur varie de 200 W à 600 W. On évalue l'efficacité du régénérateur, du coté chaud à 84 % alors que du côté froid, à 35 % environ. Il devrait y avoir équité entre les deux côtés et la détermination du phénomène devra être faite. – Le UA de l'habitacle varie aux environs de 35 W/°C, ce qui est légèrement inférieur à la charge évaluée du véhicule. – La puissance consommée par le compresseur est d'environ 800 W.
5	-15 °C	– La puissance au condenseur est d'environ 2 kW. – La puissance estimée à l'évaporateur est d'environ 1,65 kW. – Le test a été effectué sans l'apport en énergie de l'élément chauffant d'appoint dans l'habitacle. La température de l'habitacle chute rapidement. – La puissance récupérée au régénérateur varie. – Le UA de l'habitacle varie.
6	-10 °C	– Test redondant.

2.5.4 Quatrième série d'essais pour le prototype intégré dans un véhicule de Postes Canada

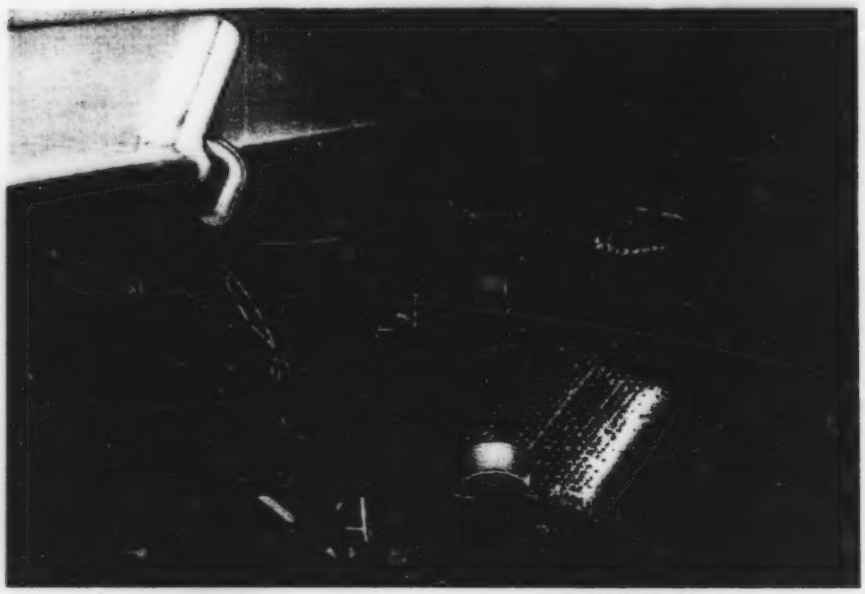


Figure 9 ***Installation du système dans le véhicule électrique***

Un prototype intégré composé de la troisième génération de régénérateur, la deuxième génération d'évaporateur/accumulateur, la troisième génération de condenseur et une valve d'expansion thermostatique a été réalisée. Le système intégré est réversible pour permettre d'opérer en chauffage et en climatisation. Nous avons dû intégrer un nouveau compresseur compte tenu du type de contrôleur disponible. Les différences dans la configuration du système installé dans le véhicule et celui testé au Laboratoire se résume essentiellement au choix du compresseur qui devait respecter l'alimentation électrique du véhicule, au contrôleur électronique (pour lequel nous étions rendus à la deuxième génération) ainsi qu'à plusieurs pièces de fixation requises dans l'environnement automobile (raccordement électrique ou de réfrigérant, support antivibration, etc.).

Des problèmes au niveau de la propulsion et de la recharge du bloc-batterie ont imposé des délais substantiels à cette phase. Les données des essais sont beaucoup plus sommaires compte tenu de l'instrumentation disponible pour le prototype intégré.

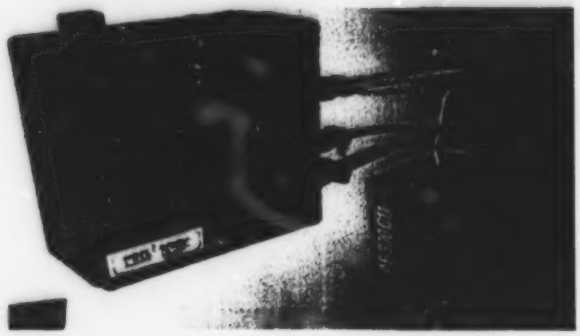


Figure 10 ***Unité de contrôle installée***

Figure 11 ***Unité de compression installée***

2.6 Révision et itérations (Étape 3)

Le prototype embarqué est en phase d'optimisation finale. Le système complet est installé dans le véhicule postal depuis l'hiver 2001. Le véhicule a été opéré sur une route postale régulière et a aussi été testé dans une chambre climatique (Environnement Canada).

Figure 12 ***Chambre climatique d'Environnement Canada à Ottawa***

3 RÉSULTATS

Les principaux développements réalisés jusqu'à maintenant touchent trois des composantes du système :

1. Le régénérateur (partenariat technologique : Innergytech - Venmar et Énerstat).
   Le régénérateur permet de fournir un débit constant d'air frais au véhicule sans trop pénaliser la consommation d'énergie tout en assurant une bonne qualité d'air intérieur et une déshumidification variant entre 0,62 L/h et 0,93 L/h d'eau (avec un débit de 70 cfm [2m^3/min] pour des températures extérieures se situant entre 0 °C et -20 °C). En conséquence, le couplage avec un desséchant s'est avéré non requis pour les applications de chauffage.

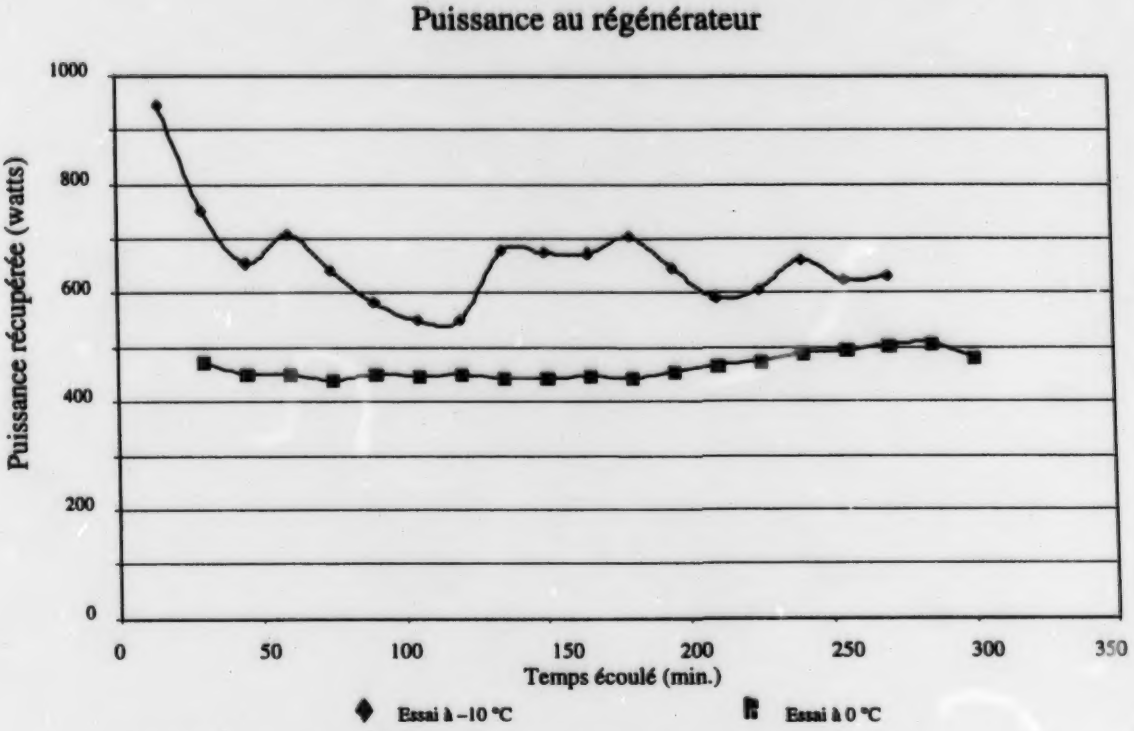


Figure 13 ***Évolution de la capacité d'échange thermique du régénérateur***

L'échangeur à récupération de chaleur appelé régénérateur offre une récupération d'énergie très intéressante d'autant qu'elle est plus importante par température froide. Les fluctuations observées pour l'essai à -10 °C sont dues à des variations de débit d'air dans l'échangeur, commandées par l'opérateur du banc d'essais. Le régénérateur actuel offre un rendement nominal d'environ 75 %, ce qui signifie que l'on récupère 75 % de la chaleur disponible dans l'air vicié de l'habitacle.

En bref, les résultats en terme d'efficacité par volume sont de 75 % de rendement pour un volume d'échange de 0,4 pi³ (0,0113m^3) [ou plus de 93 % à 1 pi³ (0,028m^3)]. Ce résultat se compare avantageusement aux échangeurs à plaques classiques, qui offrent une efficacité sensible de 70 % pour environ 1,0 pi³ (0,028m^3) ou 82 % à 0,7 pi³ (0,119m^3)pour un échangeur compact. Dans le prototype fabriqué par Innergytech, les matériaux utilisés sont essentiellement le polypropylène et l'aluminium pour maintenir le poids au minimum. Les difficultés d'intégration dans un véhicule se résument au volume qui doit être maintenu au minimum et à la fixation sur la structure du véhicule sans affecter l'étanchéité de l'ensemble.

2. Un accumulateur (partenariat technologique : Énerstat et Caron et Fils)
   L'accumulateur intégré à un évaporateur (accumulateur à expansion directe du réfrigérant) est en soit une innovation. De plus, les performances obtenues se comparent avantageusement au système de stockage existant : 95 % de rendement massique (par rapport à 60 % – 80 % pour les banques de glace typiques) et un matériau à changement de phase qui offre 330 kJ/kg (par rapport à 200 à 300) pour les autres MCP.

3. Le système de contrôle (partenariat technologique : Énerstat et SMIS R&D-CMAC)
   Station de mesure (conditions intérieures, extérieures et d'opération) entièrement programmable avec sondes numériques (température, voltage et humidité) et avec contrôle des composantes thermomécaniques sur un «bus» qui peut supporter l'environnement automobile et le bruit électrique des composantes de propulsion électriques (en cours de validation) et qui peut être raccordé sur un ordinateur à distance.

D'autres développements ont aussi été réalisés :
- Optimisation du cycle de réfrigération, incluant une étude poussée relative au choix du réfrigérant (parmi une sélection de réfrigérants azéotropes et non-azéotropes);
- Exploitation/comparaison d'orifices précalibrés, d'une valve à pointeau ou d'une valve thermostatique pour l'expansion du réfrigérant;
- Travaux relatifs au circuit hydronique pour maintenir simplement la température de la batterie;
- Intégration (et non juxtaposition) de quatre technologies de pointe (thermopompe, régénération, stockage par MCP et stratégie de contrôle numérique).

3.1 Résultats des tests complétés au LRDEC

Les résultats des tests faits au LRDEC entre 0 °C et -30 °C ont montré que le système répond bien aux changements de conditions de températures extérieures. La puissance fournie par le système actuel est d'environ 2,5 kW, une consommation du compresseur variant entre 700 W et 800 W pour un coefficient de performance variant typiquement entre 2,5 et 2,9. La durée typique de décharge de l'accumulateur est d'environ trois heures à pleine capacité sans aucun apport des sources de chaleur auxiliaires (telles que les rejets de chaleur de l'accumulateur électrique). Avec des apports externes minimes (moins de 1 kW, soit environ 20 % des rejets de chaleur disponibles dans l'ensemble du véhicule selon les études de A.D. Little [1994]), le système serait en mesure de fournir sa pleine capacité sur toute la durée des tests (soit plus de quatre heures) et l'accumulateur thermique était toujours en mesure de fournir de l'énergie au même rythme intensif.

Le graphique de la Figure 14 permet d'observer que le système RξHP^2 offre une puissance nominale semblable à 0 °C et à -15 °C. Cette particularité pour une thermopompe est obtenue grâce à l'intégration du stockage au circuit de réfrigération. Les essais démontrent clairement l'efficacité du principe. On remarque une dérive de la puissance thermique fournie à l'habitacle. Ce comportement attendu pourra être atténué par un stockage plus important et permettra ainsi, une autonomie plus grande du système.

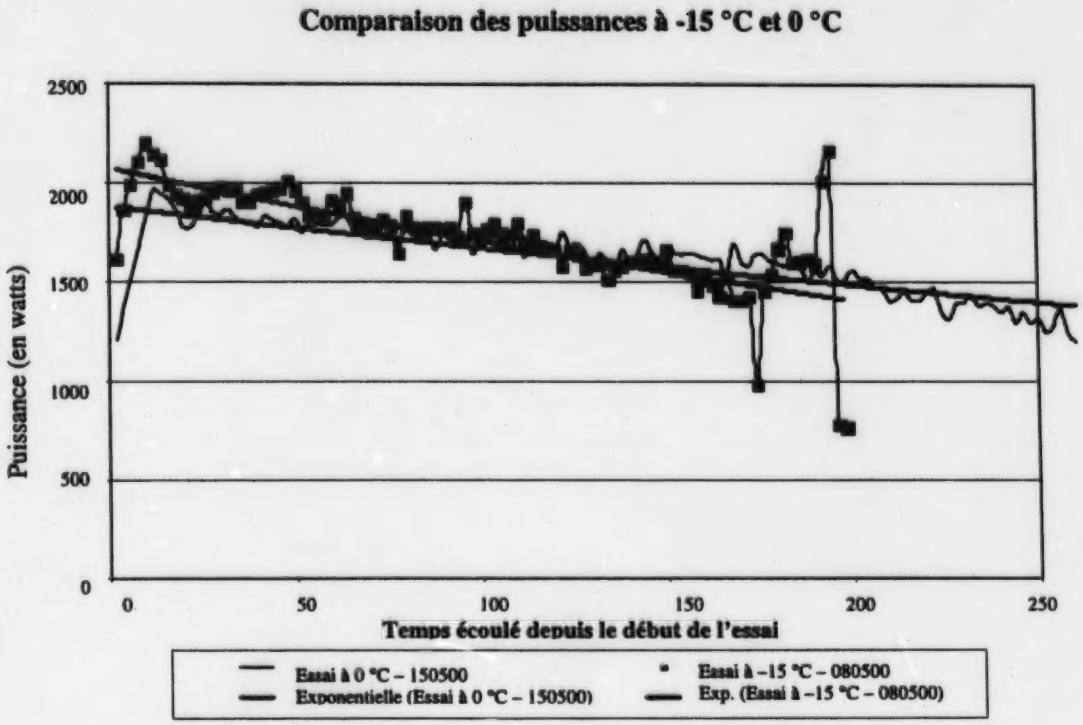


Figure 14 ***Évolution de la puissance du système à 0 °C et à -15 °C***

Le graphique de la Figure 15 présente l'effet de la température extérieure sur les performances du système.

Les résultats de COP[3] sont remarquables à très basses températures. La récupération de chaleur de l'habitacle et le stockage dans le MCP sont les éléments déterminant cette performance.

---

[3] COP : Coefficient de performance (chaleur obtenue par rapport à l'énergie électrique fournie).
Puissance de chauffage : Taux d'énergie moyen en kW fourni par le système sur l'ensemble du test.
Puissance consommée : Consommation d'énergie électrique globale du système (incluant les ventilateurs, le compresseur, les relais et valves, les composantes électroniques, etc.).

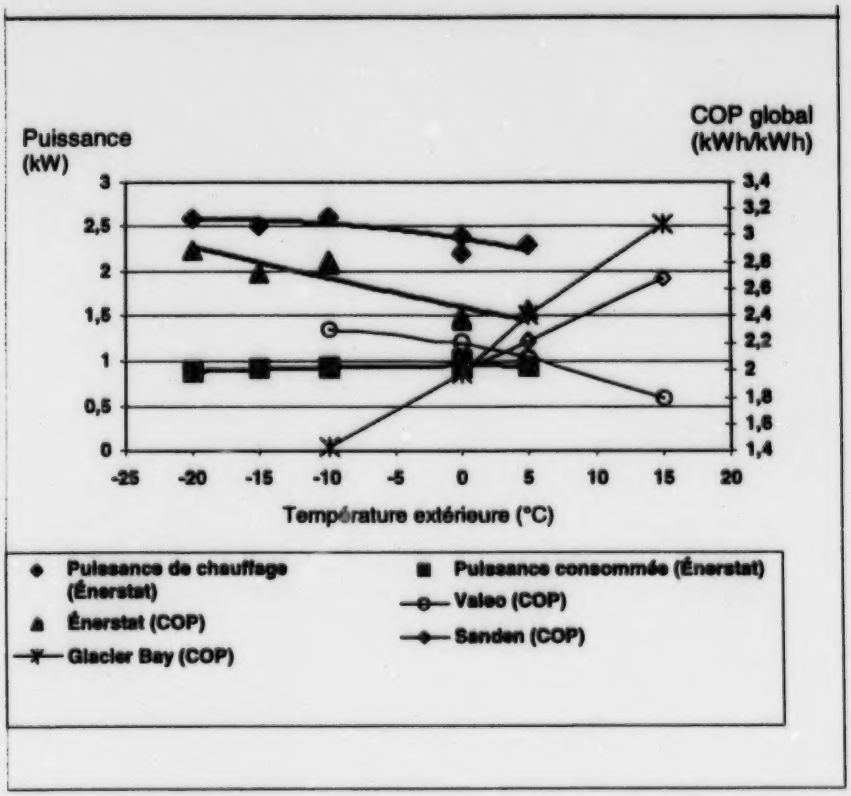


Figure 15 ***Effet de la température extérieure sur la performance***

Sur les résultats de la Figure 15, on observe que la performance du système augmente lorsque la température diminue. C'est que la puissance de chauffage demeure relativement stable, comme en fait foi la Figure 14, mais la consommation d'énergie du compresseur diminue sensiblement lorsque la température chute. Cette caractéristique représente un avantage certain du système sur les autres sources d'énergie. Les systèmes concurrents sont essentiellement des thermopompes classiques air-air pour lesquelles la performance chute lorsque la température diminue. Une exception existe, le système en développement chez Valéo, qui offre des résultats intéressants jusqu'à -10 °C en utilisant un compresseur électrique (e-compresseur). Pour le système RξHP², la consommation d'énergie est relativement stable sur l'ensemble des conditions climatiques, tandis que la puissance fournie diminue lorsque la température augmente.

En termes quantitatifs, les objectifs techniques traduits en cibles de performance sont comparés avec les résultats des tests en laboratoire après que le système RξHP² ait fait l'objet d'une conception plus poussée incluant des révisions et itérations (tests en laboratoire et développement). Ces résultats, qui se comparent dans l'ensemble avantageusement aux cibles établies, sont résumés dans le tableau 4.

Tableau 4 : Cibles de performance et résultats expérimentaux sur véhicule en chambre climatique

Objectifs	Cibles (1998)	Temp.ext.	Résultats expér.	Temp.ext.	
Autonomie du véhicule	60 %	À -20 °C	N/A	à -20 °C	% de l'autonomie en km à +20 °C
Capacité des accumulateurs	75 %	À -25 °C	N/A	à -25 °C	de la capacité en Watt-h à +20 °C
Confort	T_a 10 °C T_{dp} 0 °C	À - 20 °C	T_a 13,5 °C T_{dp} -10 °C	à -10 °C	pour toute condition externe supérieure à -20 °C et inférieure à 0 °C
COP de la thermopompe	2,0 2,5	à -20 °C à 0 °C	2,9 2,5	à -20 °C à 0 °C	COP supérieur à 2,5 entre 0 °C et -20 °C
Coût unitaire	6 000 $		5 650 $		par prototype. Coût de production visé < 2 500 $
Compacité	0,2 m³		0,22 m³		volume de l'ensemble du système pour véhicule de promenade

T_a = Température ambiante T_{dp} = Point de rosée

La puissance actuelle de 2,5 kW est insuffisante pour un véhicule automobile à -20 °C. Une amplification de la puissance est donc un enjeu de développement clé pour le futur. Les pistes envisagées sont, entre autres, un préchauffage de la cabine pour réduire la surpuissance requise au démarrage, et un apport électrique auxiliaire. Le volume de MCP semble bien proportionné pour une opération de 4 à 6 heures.

Relativement aux coûts, nous avons mis à jour les coûts de fabrication du prototype le plus récent, soit les coûts de chaque composante (matériau et main-d'oeuvre) de la troisième version en collaboration avec les partenaires industriels et les autres fournisseurs potentiels (Innergytech, Caron et Fils, CMAC, etc.).

Figure 16 ***Véhicule utilisé pour l'implantation***

3.2 Résultats des tests complétés sur le camion postal électrique

En plus des tests effectués en laboratoire (LRDEC), des mesures ont été effectuées avec le système implanté dans le véhicule de Postes Canada. Ces mesures ont été réalisées en juillet 2001 dans une des chambres climatiques d'Environnement Canada, Division recherche et mesure des émissions (Ottawa). Les Figures 17, 18, 19 et 20 montrent les résultats obtenus à la suite des essais faits à -10 °C et -20 °C. De ces graphiques, on peut en retirer un COP d'environ 3,0 pour une puissance de chauffage de 2,2 kW. La performance est similaire aux résultats obtenus au LRDEC, bien que la puissance y soit légèrement plus faible (2,5 kW mesuré au LRDEC). La raison principale pour laquelle la puissance y est plus faible est que l'on a utilisé le ventilateur existant du véhicule. Bien que cela ait simplifié grandement l'intégration du système, ce ventilateur n'avait pas la puissance suffisante pour faire circuler l'air dans le système.

Malgré tout, la capacité mesurée atteint plus de 3 heures d'autonomie. Le système peut fonctionner une heure de plus, mais la chaleur fournie durant cette dernière heure ira en diminuant. Dans des conditions très froides, le système RÇHP2 consommera environ 25 % de la capacité totale des batteries du véhicule, soit 3 kWh.

Les figures 18 et 19 présentent les résultats obtenus dans le véhicule postal en chambre climatique à -10 °C et à -20 °C. Les tendances soulevées précédemment relativement à la puissance et à la performance du système s'y retrouve. On observe, au surplus, que la durée du stockage représente environ de 3 à 4 heures d'usage en continu (sans interruption), ce qui représente environ de 6 à 8 heures d'opération moyenne (opération intermittente du système).

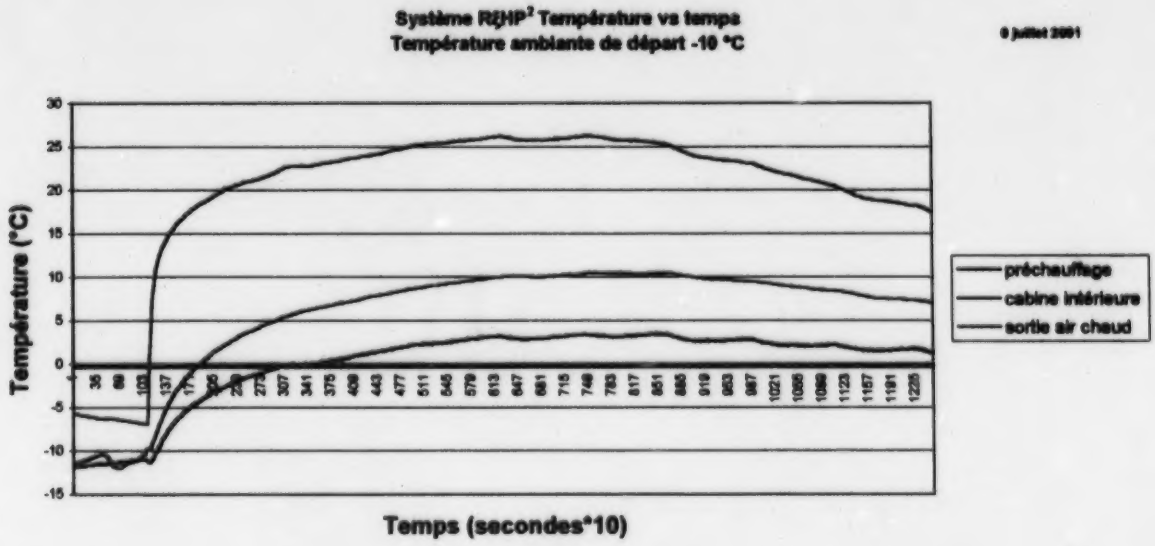


Figure 17 *Évolution de la température en fonction du temps (-10 °C)*

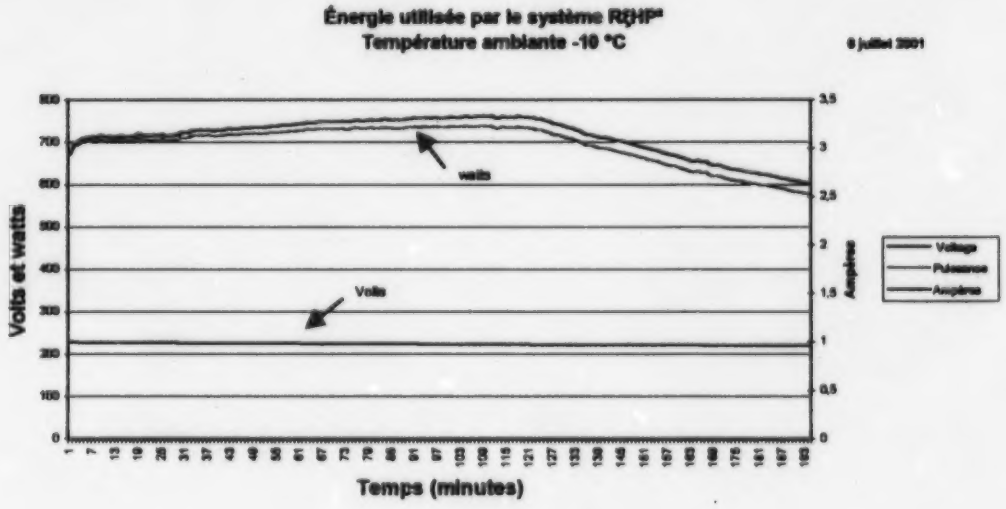


Figure 18 *Évolution de l'énergie utilisée en fonction du temps (-10 °C)*

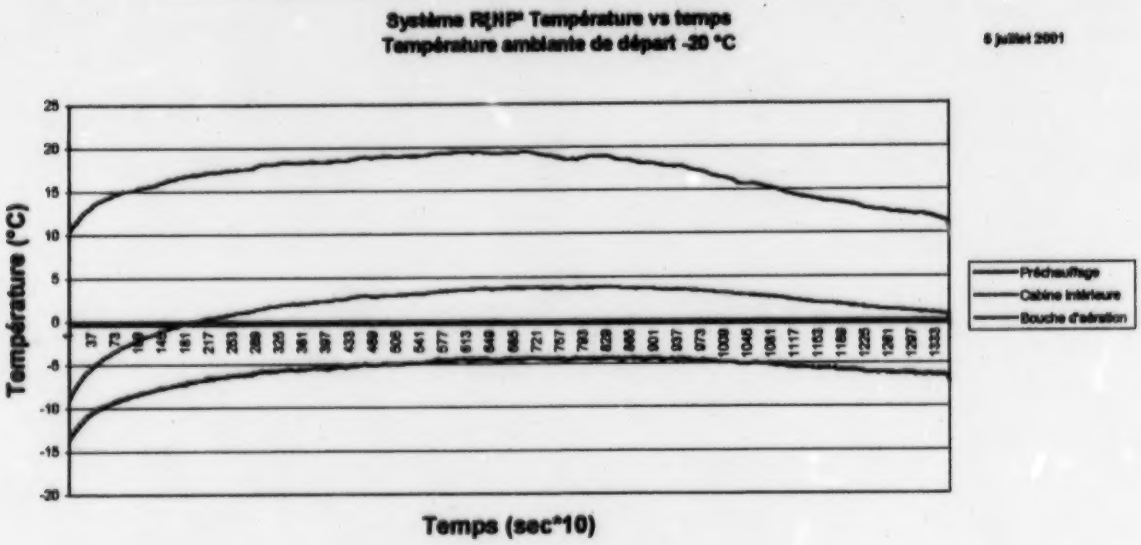


Figure 19 *Évolution de la température en fonction du temps (-20 °C)*

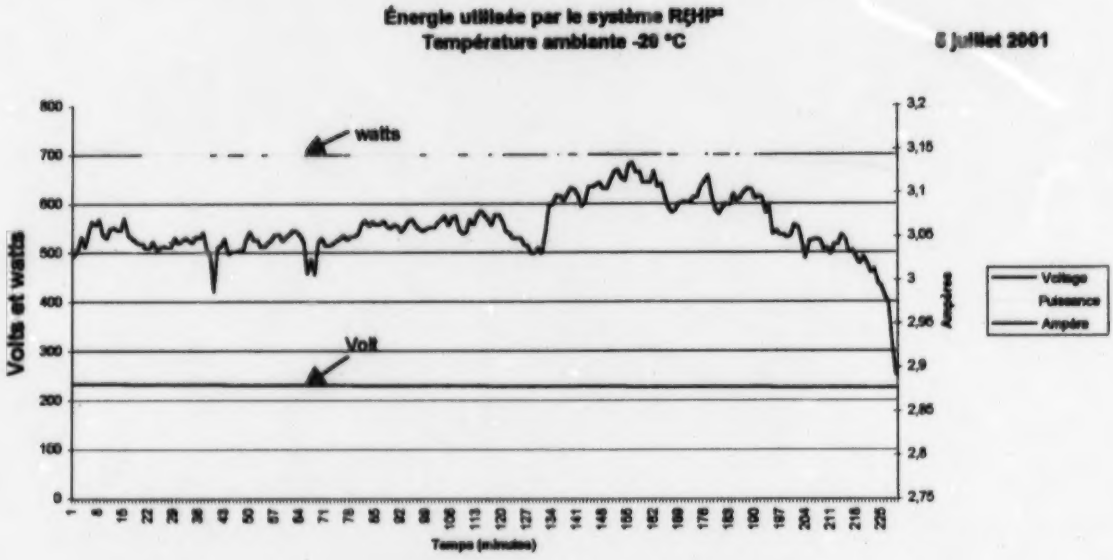


Figure 20 *Évolution de l'énergie utilisée en fonction du temps (-20 °C)*

Dans l'ensemble, les résultats obtenus sont très satisfaisants pour des systèmes frigorifiques à de telles températures. Des travaux d'optimisation sont toutefois à réaliser pour assurer une performance maximale du système.

4 DISCUSSIONS

Les enjeux de développement du projet ont été multipliés lors de l'intégration dans un véhicule. La nécessité d'un système plus puissant, l'élément coût (compétitif, volume, poids) sont ressortis comme des éléments à améliorer dans une prochaine phase précommerciale.

L'impact, voire la nécessité d'un habitacle relativement étanche pour permettre de maintenir une pression positive à l'intérieur de l'habitacle est apparu comme un élément pouvant jouer en faveur des systèmes à plus faible puissance et permettant une meilleure gestion énergétique du véhicule.

Le système RξHP^2 a été testé intensivement en mode chauffage. Son utilisation en mode climatisation a été testée en laboratoire, une perte d'efficacité appréhendée a été observée, mais les résultats montrent la possibilité réelle d'envisager la climatisation comme deuxième mode d'opération du système; qui plus est, le système pourrait permettre une approche de *«Free Cooling»* (refroidissement naturel) en certaines périodes de l'année.

Les niches d'application pour cette technologie sont, en plus des véhicules électriques de flottes commerciales, les couchettes de camions long-courrier ou les autobus hybrides et électriques pour le transport urbain ou adapté.

Quelques composantes sont aussi prometteuses dans d'autres applications. Notamment, le régénérateur comme échangeur de chaleur compact pourrait être utilisé dans des applications de bâtiments à espace restreint; le contrôle électronique pourrait être utilisé avec des systèmes de chauffage et climatisation plus conventionnels et permettre un meilleur contrôle des conditions d'opération.

Divers avantages ressortent de l'utilisation du RξHP^2 dans un VÉ opérant en climats froids :

- La performance du système est moins dépendante des conditions climatiques. Contrairement aux thermopompes air-air usuelles, le RξHP^2 peut fonctionner jusqu'à -25 °C, sans diminution significative du rendement, tout en comblant l'ensemble de la charge de chauffage et de ventilation du véhicule. Le couplage du régénérateur et du stockage thermique permet de stabiliser les températures de fonctionnement des sources chaude et froide de la PAC.
- La régénération de l'énergie permet un renouvellement constant de l'air de l'habitacle assurant une qualité de l'air maximale et un dégivrage efficient des surfaces vitrées sans pénalité énergétique importante.
- De par sa nature flexible, le système RξHP^2 peut s'adapter aux besoins de différentes catégories d'automobiles ou de véhicules utilitaires tels les camionnettes ou les autobus. En fait, un grand nombre d'applications secondaires sont envisagées pour des versions simplifiées du système : le chauffage des cabines de locomotive, la gestion climatique des véhicules motorisés ou des bateaux de plaisance, etc.
- Le système intégré assure une autonomie optimale des accumulateurs électriques, jusqu'à -25 °C où l'on maintient 65 % et 78 % de l'autonomie nominale (suivant l'accumulateur), et ce, tout en assurant le chauffage de la cabine et de l'air frais.

De plus, le système permet de maintenir un confort, un renouvellement d'air et un dégivrage de vitres, et ce, même à des températures inférieures à -20 °C et sans utilisation de carburant fossile.

Le système RξHP² rencontre les cibles de performance établies. Il reste toutefois divers éléments à optimiser :

- le volume du système, qui devrait pouvoir être réduit de près de 15 %;
- le mode d'alimentation de puissance pour le compresseur de vapeur de fréon;
- la stratégie de contrôle du système pour assurer un mode d'opération quasi invisible pour l'utilisateur et une puissance de chauffage toujours optimale.

En bref, une phase de développement final précommerciale, devrait être envisagée avant la commercialisation du système. Le présent projet a démontré le potentiel technique de la technologie. Une précision de la ou des niches de marchés spécifiques visés devrait être faite préalablement au développement final pour maximiser le potentiel commercial du système.

5 CONCLUSIONS

En définitive, le projet a permis de valider le concept élaboré par l'équipe du Groupe Énerstat inc., développé depuis plus de 5 ans. Chacune des composantes du système a d'ailleurs été réalisée et validée en collaboration avec les partenaires industriels. La liste suivante résume les composantes prépondérantes du RξHP²:

- Un régénérateur de chaleur compact de type air/air;
- Une pompe à chaleur haute performance intégrant...
  ...un accumulateur de chaleur par stockage latent,
  ...un système à compression de vapeur de puissance réduite,
  ...un condenseur compact.

BIBLIOGRAPHIE

ABERSFELDER, GUENTER, HELMUT GRANTZ et WOLFGANG ODEBRECHT. *Device for Air-conditioning the Passenger Compartment and for Cooling the Drive System of Electric Vehicles*, U.S. Patent #5483807, janvier 1996.

AEG ZEBRA BATTERY MARKETING GmbH. "Zebra Power!", *Electric & Hibrid Vehicle Technology*, 1997.

AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE. *Véhicules électriques : technologies, performances et perspectives*, OEDC, 1994, p. 8-19, 30-43, 66-73, 80-87, 106-111 et 174-177.

ASSOCIATION CANADIENNE DU VÉHICULE ÉLECTRIQUE. *EVAC Overview*, Ontario, EVAC, 21 janvier 1998, p. 7.

BARUSCHKE, WILHELM, KARL LOCHMAHR et WERNER ROJNICA. *Device for Cooling Drive Components and Heating a Passenger Compartment of an Electric Vehicle*, U.S. Patent #5549153, août 1996.

BRADLEY, M.J. et autres. *Northeast Advanced Thermal Management Technology Project*, Northeast Alternative Vehicle Consortium, Boston, États-Unis, octobre 1996, 27 p.

BURCH, S. D., PARISH, R. C. et M. A. KEYSER. *Thermal Management of Batteries Using a Variable-Conductance Insulation (VCI) Enclosure*, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, États-Unis, 10 p.

CARR, PETER. *Thermal Storage System for a Vehicle*, U.S. Patent #5277038, janvier 1994.

CLEAN TRANSPORTATION ADVANCED SYSTEMS ENGINEERING BCRI. *The Feasability of Using Rollbond Heat Exchangers for Thermal Management of Electric Vehicles - Final Report*, Alternative Energy Division, Natural Resources Canada, Ottawa, Canada, janvier 1996, 116 p.

«*Cold Weather a Nemesis for Advanced Battery Initiatives*», *USCAR Newsletter*, Technology in Action, été 1995, 1 p.

DAUVERGNE, J. *Le confort thermique des véhicules électriques*, RGE, novembre 1993, N° 10, p. 53-56.

DAUVERGNE, John L. «*Thermal Comfort of Electric Vehicles*», *SAE Paper*, N° 940295, février 1994.

FUKUMOTO, MINORU et NORIO YOSHIDA. *Heat pump Cooling-Heating-Dehumidifying System for Electric Vehicle*, U.S. Patent #5709102, janvier 1998

GARABEDIAN, H., ESPANOSA, R. et al. «Baseline Performance of a Nickel Metal Hydride Powered EV Operating in Vermont», *EVS 14 Conference*, Floride, États-Unis, décembre 1997.

HOTTA, YOSCHIHIKO et AKIHIRO TAJIRI. *Air Conditioning System Suitable for Use in a Electric Vehicle*, U.S. Patent #5305613, avril 1994.

KELLER, G., A. RAFALOVICH et T. C. SCHMIDTER. «Non-Idling Heating and Air Conditioning System Providing Economic Benefits and Environmental Solutions», *VTMS 3, Vehicle Thermal Management Systems*, Indiana, États-Unis, du 19 au 22 mai 1997, p. 211-224.

KELZ, MICHAEL et WOLFGANG ODEBRECHT. *Device for Heating an Interior of an Electric Vehicle*, U.S. Patent #5647534, juillet 1997.

LANE, R. «Winter Operation of Electric Vehicles», *Northeast Sustainable Energy Association (NESEA) Sustainable Transportation Symposium*, New York, États-Unis, septembre 1996, p. 16-18.

LITTLE, Arthur D. «Electric Vehicle Thermal Management for Cold Weather Operation» *Northeast Research Projects Agency*, États-Unis, octobre 1994, 61 p.

LONGARDNER, WILLIAM J., ALEXANDER P. RAFALOVICH et al. *Encapsulations for Thermal Management System for Battery*, U.S. Patent #5449571, septembre 1995.

POMMÉ, Vincent. «Reversible Heat Pump System for an Electrical Vehicle», *Vehicle Thermal Management Systems, VTMS 3*, Indiana, États-Unis, du 19 au 22 mai 1997, p. 19-24.

SUZUKI, T. et K. ISHII. «Electric Vehicle Air Conditionning, Optimizing accessories Helps to Extend Electric Vehicle Range», *Automotive Engineering*, SAE International, Warrendale, PA, États-Unis, septembre 1996, p. 113-117.

TAJIRI, AKIHIRO, YOSHIHIKO HOTTA et al. *Battery Temperature Control System in Electric Automobile*, U.S. Patent #5490572, février 1996.

TIEDEMANN, WILLIAM H. et JOHN NEWMAN. *Thermal Management of Battery Systems*, U.S. Patent #5385793, janvier 1995.

VALLIÈRES, N., BERGEVIN, B. et P. HOSATTE. *Amélioration du rendement du véhicule électrique Chrysler Tevan pour les conditions climatiques hivernales* TP12831F, Centre de développement des transports, Sûreté et Sécurité, Transports Canada, Montréal, août 1996, 118 p.